

UNIVERSITE DE LIEGE
Faculté de Psychologie et des Sciences de l'Education

LA MEMOIRE PROCEDURALE CHEZ L'ENFANT

**ETUDES DANS LE DEVELOPPEMENT NORMAL ET
DANS LE TROUBLE DE L'ACQUISITION DE LA COORDINATION**

Caroline Lejeune

Thèse présentée en vue de l'obtention du titre de
Docteur en Sciences Psychologiques et de l'Education

Sous la direction de Thierry Meulemans

Jury de thèse composé d'*Hélène Beaunieux, Jean-Jacques Detraux,*
Christelle Maillart, Thierry Meulemans et Pascal Zesiger

2013-2014

à Julien et Eliott

à mes parents

REMERCIEMENTS

Je tiens à adresser mes premiers remerciements à Thierry Meulemans qui, par ses connaissances, son ouverture d'esprit et son écoute attentive, m'a permis de réaliser ce travail dans les meilleures conditions. Merci Thierry pour tes relectures, tes intuitions et tes conseils enrichissants qui m'ont beaucoup aidée tout au long de ce parcours. Merci de m'avoir si souvent aiguillée, rassurée et surtout « reboostée » ! Tes encouragements m'ont été très précieux dans les moments de doute et m'ont donné l'envie d'aller jusqu'au bout de cette grande aventure ! Je profite de ces quelques lignes pour te remercier de m'avoir fait confiance en me choisissant comme assistante et de m'avoir tant appris durant toutes ces années.

Je remercie Hélène Beaunieux, Jean-Jacques Detraux, Christelle Maillart et Pascal Zesiger qui ont accepté de consacrer du temps à la lecture de ce travail.

Je tiens également à remercier mes (super) collègues, qui m'ont tous aidée à un moment ou l'autre de ce travail : je pense à Murielle Wansard, Corinne Catale, Xavier Schmitz, Sophie Germain, Marie Geurten, Megan Fresson, Fabienne Collette, Sarah Merbah et Sylvie Willems. Quelle chance j'ai de travailler à vos côtés, dans une ambiance du tonnerre, avec des moments de fous rires, d'émotions, de stress et des temps de midi tellement détendants !!! J'aimerais, en particulier, dire un grand merci à Corinne pour m'avoir fait partager sa passion pour la neuropsychologie de l'enfant, pour m'avoir accueillie les bras ouverts à ses côtés en tant que clinicienne et pour tant d'autres choses... Merci Corinne, mais aussi Murielle (*Barcelona...*), Sarah et Sophie (*yéyé les soupers*) pour votre amitié qui m'est si précieuse !!!! J'aimerais évidemment remercier Xavier qui a partagé mon bureau, mes humeurs et les derniers « cancons de la fac »... Merci Xa pour ton amitié, mais aussi pour m'avoir aiguillée sur tant de questions théoriques et statistiques !! Merci à Megan et Marie pour leurs messages débordants d'enthousiasme. Merci aussi à Isabelle, Joëlle et Marie-Noëlle, nos trois super secrétaires, pour les nombreux services rendus et pour leur bonne humeur, tout simplement.

J'aimerais remercier ma famille. Tout particulièrement mes parents qui sont si présents dans ma vie et qui me donnent tellement sans compter !!!! Merci à tous les deux de m'avoir transmis des valeurs essentielles (surtout la persévérance...) et de m'avoir encouragée, soutenue durant mes études, mon séjour à Grenoble et tout au long de ce projet de thèse. Merci papa pour tes relectures et tes précieux conseils. Merci maman de m'avoir donné tant de « punch » et de pensées positives ! J'aimerais également remercier mes deux grandes sœurs, Gene et Marie, ma belle-famille et mes amis qui n'ont eu de cesse de m'encourager, par leurs messages, ces derniers mois malgré mon « isolement ». Un immense merci à Gene, Marie, Sarah et Carine pour leur relecture rigoureuse !!

Cette thèse n'aurait tout simplement pas pu voir le jour sans les innombrables personnes (et surtout, les enfants) qui se sont prêtées, avec tant d'enthousiasme et de concentration, aux séances (souvent longues et fastidieuses...), de même que les étudiants qui se sont investis avec autant d'ardeur dans mes projets.

Enfin, merci à toi Julien. Rien de tout cela n'aurait été possible sans ton soutien moral, tes conseils, ta présence et tes mots si réconfortants. Merci aussi d'avoir pris tant de choses en charge ces derniers mois pour me permettre de rédiger en toute sérénité. Et toi, Eliott, notre p'tit bonhomme, qui rayonne et nous procure depuis presque deux ans tant de bonheur ! Ta joie de vivre au quotidien a été une véritable bouffée d'oxygène dans les moments les plus stressants. Merci à tous les deux de m'avoir donné l'énergie nécessaire à la réalisation de ce travail de longue haleine...

Le 16 novembre 2013.

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCTION | 1 |
| PARTIE THEORIQUE | 5 |
| CHAPITRE 1 MEMOIRE PROCEDURALE | 7 |
| DEFINITION | 7 |
| MODELES D'ACQUISITION D'HABILETES PROCEDURALES..... | 11 |
| <i>De l'explicite vers l'implicite : les modèles « top-down »</i> | <i>11</i> |
| <i>De l'implicite vers l'explicite : les modèles « bottom-up »</i> | <i>14</i> |
| <i>Apprentissage explicite et implicite : vers une interaction.....</i> | <i>19</i> |
| APPRENTISSAGE IMPLICITE OU PROCEDURAL ? UNE TENTATIVE DE CLARIFICATION | 21 |
| CHAPITRE 2 ACQUISITION D'HABILETES PROCEDURALES PERCEPTIVO-MOTRICES : PARADIGMES EXPERIMENTAUX | 25 |
| ADAPTATION PERCEPTIVO-MOTRICE | 25 |
| APPRENTISSAGE DE SEQUENCES PERCEPTIVO-MOTRICES | 26 |
| COMPARAISON DES DEUX PARADIGMES D'APPRENTISSAGE..... | 29 |
| <i>Caractéristiques de l'information acquise.....</i> | <i>29</i> |
| <i>Mécanismes impliqués dans l'apprentissage procédural.....</i> | <i>31</i> |
| <i>Substrats neuronaux</i> | <i>35</i> |
| CHAPITRE 3 MEMOIRE PROCEDURALE ET DEVELOPPEMENT..... | 41 |
| DEVELOPPEMENT DES STRUCTURES CEREBRALES | 42 |
| <i>Généralités</i> | <i>42</i> |
| <i>Développement du striatum et du cervelet.....</i> | <i>43</i> |
| DEVELOPPEMENT DE LA MEMOIRE DECLARATIVE | 44 |
| DEVELOPPEMENT DE LA MEMOIRE PROCEDURALE | 46 |
| <i>Petite enfance</i> | <i>47</i> |
| <i>Périodes préscolaire et scolaire.....</i> | <i>48</i> |
| DEVELOPPEMENT DES FONCTIONS EXECUTIVES | 56 |
| MODELES D'ACQUISITION D'HABILETES CHEZ L'ENFANT | 58 |
| CONCLUSION | 60 |
| CHAPITRE 4 NEUROPSYCHOLOGIE DE LA MEMOIRE PROCEDURALE CHEZ L'ENFANT | 63 |
| MEMOIRE PROCEDURALE ET PATHOLOGIES ACQUISES | 63 |
| MEMOIRE PROCEDURALE ET TROUBLES DU DEVELOPPEMENT | 65 |

| | |
|--|----|
| <i>Hypothèse d'un déficit de mémoire procédurale dans la dyslexie</i> | 67 |
| <i>Vers une étiologie commune des troubles spécifiques de l'apprentissage chez l'enfant</i> | 70 |
| CONCLUSION | 72 |

CHAPITRE 5 MEMOIRE PROCEDURALE ET TROUBLE DE L'ACQUISITION DE LA COORDINATION.....73

| | |
|---|-----|
| TROUBLE DE L'ACQUISITION DE LA COORDINATION | 73 |
| <i>Définition et caractéristiques</i> | 73 |
| <i>Etiologie</i> | 81 |
| <i>Théories explicatives du trouble de l'acquisition de la coordination</i> | 83 |
| LE TAC SELON L'HYPOTHESE D'UN DEFICIT DE LA MEMOIRE PROCEDURALE..... | 88 |
| <i>Corrélatés cérébraux</i> | 88 |
| <i>Données comportementales</i> | 92 |
| CONCLUSION | 100 |

PARTIE EXPERIMENTALE.....103

DEVELOPMENTAL INVARIANCE IN IMPLICIT SEQUENCE LEARNING113

| | |
|--|-----|
| INTRODUCTION | 114 |
| METHODS..... | 118 |
| <i>Participants</i> | 118 |
| <i>Materials and procedure</i> | 119 |
| RESULTS | 120 |
| <i>Serial Reaction Time Task</i> | 120 |
| <i>Explicit sequence awareness</i> | 123 |
| DISCUSSION | 124 |

AGE-RELATED DIFFERENCES IN PERCEPTUOMOTOR PROCEDURAL LEARNING IN CHILDREN129

| | |
|--|-----|
| INTRODUCTION | 130 |
| METHOD | 133 |
| <i>Participants</i> | 133 |
| <i>Measures</i> | 134 |
| PROCEDURE | 136 |
| RESULTS | 137 |
| <i>Initial performance with the mouse in its usual orientation</i> | 137 |
| <i>Did the familiarity with the use of the mouse in its usual orientation have an impact on performance with the inverted mouse?</i> | 137 |
| <i>Perceptuomotor procedural learning</i> | 137 |

| | |
|--|------------|
| <i>Correlation analyses</i> | 141 |
| DISCUSSION | 142 |
| AGE DIFFERENCE IN DUAL-TASK INTERFERENCE EFFECTS ON PROCEDURAL LEARNING | 149 |
| INTRODUCTION | 150 |
| METHOD | 153 |
| <i>Participants</i> | 153 |
| <i>Measures</i> | 155 |
| <i>Procedure</i> | 156 |
| <i>Analysis</i> | 157 |
| RESULTS | 157 |
| <i>Dual-task condition effect during the mirror tracing task</i> | 157 |
| <i>Auditory interference task</i> | 160 |
| <i>Learning curve (trials 3 to 18)</i> | 160 |
| DISCUSSION | 162 |
| CONCLUSION | 165 |
| INTACT PROCEDURAL MOTOR SEQUENCE LEARNING IN DEVELOPMENTAL COORDINATION DISORDER..... | 167 |
| INTRODUCTION | 168 |
| METHOD | 171 |
| <i>Participants</i> | 171 |
| <i>Material</i> | 173 |
| <i>Serial Reaction Time (SRT) task</i> | 173 |
| <i>Explicit awareness test</i> | 175 |
| STATISTICAL METHODS | 175 |
| RESULTS | 175 |
| <i>Serial Reaction Time (SRT)</i> | 175 |
| <i>Explicit awareness</i> | 177 |
| DISCUSSION | 178 |
| CONCLUSION | 182 |
| PROCEDURAL LEARNING, CONSOLIDATION, AND TRANSFER OF A NEW SKILL IN DEVELOPMENTAL COORDINATION DISORDER..... | 185 |
| INTRODUCTION | 186 |
| METHOD | 189 |
| <i>Participants</i> | 189 |
| <i>Measures</i> | 190 |
| RESULTS | 192 |
| <i>Perceptuomotor procedural learning task</i> | 192 |

| | |
|--|------------|
| <i>Relationship between procedural performance and motor deficits in the DCD group</i> | 194 |
| DISCUSSION | 195 |
| AUTOMATISATION D'UNE HABILETE DE DESSIN EN MIROIR DANS LE TROUBLE DE L'ACQUISITION DE LA COORDINATION : RESULTATS PRELIMINAIRES | 199 |
| INTRODUCTION | 200 |
| METHODE..... | 202 |
| <i>Sujets</i> | 202 |
| <i>Matériel et procédure</i> | 202 |
| RESULTATS ET DISCUSSION | 203 |
| DISCUSSION GENERALE | 211 |
| SYNTHESE DES RESULTATS | 213 |
| IMPLICATIONS THEORIQUES ET CLINIQUES..... | 218 |
| <i>Statut de la mémoire procédurale dans le développement normal</i> | 218 |
| <i>Statut de la mémoire procédurale dans le TAC</i> | 230 |
| INTERETS ET LIMITES DES EPREUVES PROCEDURALES | 239 |
| <i>La tâche de temps de réaction sériel</i> | 239 |
| <i>La tâche de souris inversée</i> | 241 |
| <i>La tâche de dessin en miroir</i> | 243 |
| CONCLUSION | 245 |
| BIBLIOGRAPHIE..... | 247 |

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Chaque jour, nous accomplissons une multitude de gestes qui dépendent de notre *mémoire procédurale*. Ecrire un mot sur la porte du frigo, boutonner sa veste, se préparer un café, écrire un SMS, conduire une voiture font partie de notre « train-train » quotidien. Ces gestes s'exécutent naturellement, sans y penser, sans y prêter une attention particulière et sans fatigue. Ils constituent ce que l'on appelle « des routines », c'est-à-dire des *habiletés procédurales*. Pourtant, ces gestes qui nous paraissent si simples, si anodins, ont dû faire l'objet d'un apprentissage, parfois long et laborieux... On estime généralement que l'apprentissage d'une nouvelle habileté est un processus complexe qui requiert de nombreuses ressources cognitives.

L'acquisition d'habiletés ou *savoir-faire* est amorcée dès la petite enfance : apprendre à manger avec des couverts, à nouer ses lacets, à rouler à vélo, à manier le crayon, puis à écrire est essentiel à l'autonomie de l'enfant ainsi qu'à son développement cognitif. Les nombreuses habiletés maîtrisées durant l'enfance ont alimenté l'idée répandue de l'émergence précoce de la mémoire procédurale. Toutefois, si ce constat est évoqué d'un point de vue théorique, il est encore très peu établi sur le plan empirique. En effet, les situations expérimentales classiques d'apprentissage procédural (comme par exemple, le dessin en miroir) ont été peu explorées dans une perspective développementale. Dès lors, de nombreuses questions restent à ce jour en suspens, notamment concernant la nature des mécanismes cognitifs qui sous-tendent l'apprentissage procédural chez l'enfant comparativement à l'adulte.

Apprendre à coordonner ses mouvements de façon fluide et efficace peut être, pour certains enfants, une tâche laborieuse. On estime que 6% des enfants d'âge scolaire ont un trouble de l'acquisition de la coordination (TAC). Ce trouble apparaît chez des enfants d'intelligence normale et se manifeste principalement par une grande maladresse dans les activités qui requièrent précision et rythme, mais il est également caractérisé par des retards importants dans l'acquisition de certaines habiletés motrices (comme par exemple l'écriture). Ces dernières années, de nombreuses recherches ont tenté de comprendre l'origine des difficultés motrices des enfants TAC,

mais de façon surprenante, peu de travaux ont été consacrés à l'étude de la mémoire procédurale dans ce groupe.

L'objectif principal de ce travail de thèse est de contribuer à une meilleure compréhension de la mémoire procédurale dans le développement normal et dans le trouble de l'acquisition de la coordination (TAC), en prêtant une attention particulière à l'apprentissage d'habiletés perceptivo-motrices. Ce travail s'articule dès lors en deux parties.

L'objectif de la première partie est de viser à une meilleure compréhension du développement de la mémoire procédurale. Nos travaux de recherche se concentrent sur deux catégories de tâches : l'adaptation perceptivo-motrice (par exemple, le dessin en miroir) et l'apprentissage d'une séquence motrice (par exemple, le temps de réaction sériel - TRS), nous donnant ainsi l'opportunité d'investiguer le développement des formes implicites d'apprentissage procédural (Etude 1), mais également, au travers de la tâche d'adaptation motrice, d'explorer le rôle joué par les mécanismes explicites durant l'acquisition de l'habileté à différentes étapes du développement cognitif de l'enfant (Etude 2 et 3).

L'objectif de la seconde partie est de tester l'hypothèse d'un déficit des capacités de mémoire procédurale dans le trouble de l'acquisition de la coordination. Dans cette optique, nous avons évalué les capacités de mémoire procédurale d'enfants diagnostiqués TAC à l'aide de la tâche de TRS (Etude 4) et de la tâche d'adaptation perceptivo-motrice (Etude 5). Enfin, et de façon plus spécifique, nous avons investigué les capacités d'automatisation d'une habileté de dessin en miroir à l'aide du paradigme de double tâche chez des enfants TAC (Etude 6).

Avant d'aborder la partie expérimentale de ce travail, nous proposons une synthèse théorique des recherches réalisées dans ce domaine.

PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE 1

MEMOIRE PROCEDURALE

Dans ce premier chapitre, nous commencerons par définir précisément le concept de mémoire procédurale. Nous aborderons ensuite les modèles théoriques d'acquisition d'habiletés procédurales.

Dans la littérature, il règne une certaine confusion concernant les concepts « d'apprentissage procédural » et « d'apprentissage implicite ». C'est pourquoi, nous tenterons de clarifier ces deux notions en précisant également notre point de vue.

DEFINITION

Faire du vélo, utiliser une souris d'ordinateur, écrire, sont des activités qui ne sont pas « naturelles », mais qui s'apprennent. Ces gestes, une fois appris, sont normalement exécutés, sans y penser, sans y prêter une attention particulière et sans fatigue. Ils constituent ce que l'on appelle « des routines » – c'est-à-dire des habiletés procédurales, automatisées, qui s'exécutent naturellement et dont le caractère automatique est attesté par le fait qu'elles peuvent être réalisées sans peine, en même temps qu'une autre tâche.

La notion de « mémoire procédurale » se réfère à notre capacité à acquérir progressivement des habiletés (c'est-à-dire des *savoir-faire*, par opposition aux *savoirs* qui caractérisent la mémoire déclarative), à les stocker et à les restituer ultérieurement (N. J. Cohen & Squire, 1980). La particularité de la mémoire procédurale, par comparaison avec les autres systèmes mnésiques, est que la connaissance acquise s'exprime au travers de l'activité de la personne, sans qu'il soit nécessaire de faire référence aux expériences antérieures d'apprentissage. La connaissance procédurale s'acquiert par la pratique répétée de la tâche, au fil de nombreux essais qui conduisent progressivement à une *automatisation* de la connaissance ; le contenu de celle-ci devient alors difficilement verbalisable (les informations mémorisées sont difficiles à décrire avec des mots). Par exemple, si nous sommes tout à fait capables de conduire une voiture, en changeant les vitesses, en freinant à l'approche d'un feu rouge, il nous est beaucoup plus difficile d'expliquer verbalement à un novice à quel moment il faut débrayer pour changer de vitesse ; pour démontrer notre connaissance, nous n'avons dans ce cas d'autre choix que d'exécuter le geste nous-même. Une fois automatisées, les habiletés procédurales résistent aux interférences, ainsi qu'à l'oubli (Doyon & Ungerleider, 2002). En effet, le geste appris peut être rapidement retrouvé malgré une longue période sans pratique (par exemple, rouler à vélo).

La mémoire procédurale est souvent définie en référence à la dichotomie entre mémoire procédurale et mémoire déclarative. Cette distinction a été adoptée par de nombreux auteurs (par exemple, N. J. Cohen & Squire, 1980), tout comme l'a été celle entre processus explicites et implicites (Graf & Schacter, 1985) (voir *Encart 1*). La mémoire procédurale correspond au « *knowing how* » (savoir comment) et fait partie de la mémoire dite non-déclarative. Ses contenus sont généralement décrits comme implicites car ils sont difficilement verbalisables et, souvent, inaccessibles à la conscience, contrairement à la connaissance déclarative ou « *knowing that* » (savoir quoi)¹, pour laquelle l'information stockée est dite explicite car la connaissance est facilement verbalisable et accessible à la conscience. Par contraste avec la mémoire déclarative, la mémoire procédurale est généralement décrite comme un système

¹ La mémoire déclarative est impliquée dans l'apprentissage, l'encodage et l'utilisation des connaissances générales (mémoire sémantique) ou spécifiques (mémoire épisodique) (Guillery-Girard, Quinette, Piolino, Desgranges, & Eustache, 2008).

robuste, qui résiste aux effets de l'âge et à de nombreuses pathologies cérébrales. Ces deux types de mémoire se distinguent également par leurs substrats cérébraux. Ainsi, la mémoire procédurale est sous-tendue par des structures sous-corticales telles que le striatum et le cervelet², tandis que ce sont principalement les structures diencephaliques et la région temporale médiane qui interviennent dans la mémoire déclarative (Squire, 2004). Comme nous le verrons dans le chapitre 3, ces structures cérébrales se développent selon une chronologie différente chez l'enfant. En raison de l'émergence précoce des structures impliquées dans la mémoire procédurale, il est communément admis que les capacités de la mémoire procédurale se développent plus tôt que celles relevant de la mémoire déclarative (A. S. Reber, 1993).

Encart 1 : Processus explicites et processus implicites

Contrairement aux concepts de mémoire procédurale et de mémoire déclarative, les termes « implicite » et « explicite » ne font pas référence à des systèmes de mémoire en tant que tels ; ces termes, dont la valeur est essentiellement descriptive, permettent de définir la manière dont une information en mémoire est encodée ou récupérée (Guillery-Girard et al., 2008). Ainsi, on utilise le terme de « mémoire explicite » pour caractériser des situations de mémoire dans lesquelles le mode de récupération est volontaire et conscient. A l'inverse, le concept de mémoire implicite fait référence à un mode de récupération non intentionnel et non conscient d'informations apprises antérieurement (cf. les effets d'amorçage). De l'autre côté, les notions d'apprentissage implicite et d'apprentissage explicite concernent, quant à elles, l'étape d'acquisition (d'encodage) de la connaissance. Le concept d'apprentissage implicite, défini par opposition à l'apprentissage explicite, renvoie ainsi à notre capacité à apprendre de nouvelles informations de façon incidente, sans nous rendre compte que nous sommes dans une situation d'apprentissage (Seger, 1994). La notion d'apprentissage implicite est décrite page 17.

La mémoire procédurale en tant que système de mémoire a été envisagée par Tulving (1995) dans son modèle SPI (Serial – Parallel – Independent), lequel comprend cinq systèmes de mémoire organisés hiérarchiquement. Ceux-ci sont classés selon leur ordre d'émergence, en référence à la phylogenèse et à l'ontogenèse humaine : la mémoire épisodique, la mémoire de travail, la mémoire sémantique, les systèmes de représentation perceptive et la mémoire procédurale. Ainsi, la mémoire épisodique est

² Les substrats neuronaux de la mémoire procédurale sont présentés dans la section « substrats neuronaux » de ce chapitre.

le système mnésique situé au niveau le plus élevé de cette hiérarchie car elle apparaît plus tardivement dans l'enfance (c'est vrai également au niveau phylogénétique). A contrario, au vu de sa maturation précoce, la mémoire procédurale représente le premier niveau de cette hiérarchie. Toutefois, ce modèle comporte quelques limites, comme le fait qu'aucun lien entre la mémoire procédurale et les autres systèmes mnésiques n'est envisagé (Eustache & Desgranges, 2003). Pour pallier cette limite, Eustache et Desgranges (2003) proposent le modèle MNESIS (Modèle Neo-Structural Inter-Systémique de la mémoire humaine), qui intègre davantage les relations entre les différents systèmes de mémoire. Ce modèle prévoit par exemple que le processus d'apprentissage en mémoire procédurale requiert la contribution de plusieurs systèmes, parmi lesquels la mémoire épisodique et la mémoire de travail.

L'acquisition d'habiletés est un phénomène hétérogène, qui regroupe des situations très différentes d'apprentissage. Les habiletés acquises en mémoire procédurale varient tant par leur nature que par leur complexité. Le modèle MNESIS les décompose en trois modules : l'apprentissage procédural perceptivo-moteur (par exemple, habileté à utiliser une souris d'ordinateur ou à conduire un véhicule), l'apprentissage procédural perceptivo-verbal (habiletés de lecture) et l'apprentissage procédural cognitif (habileté à jouer aux échecs, par exemple). Il est maintenant communément admis que les mécanismes sous-tendant ces habiletés procédurales diffèrent. Ainsi, il existe des dissociations entre les habiletés perceptives et les habiletés cognitives (voir par exemple, les études chez les patients amnésiques, Gabrieli, Corkin, Mickel, & Growdon, 1993; Schmidtke, Handschu, & Vollmer, 1996), mais aussi entre les tâches évaluant une même habileté perceptivo-motrice (voir par exemple, les dissociations entre la tâche de poursuite rotative et celle de dessin en miroir chez les patients parkinsoniens: Gabrieli, Stebbins, Singh, Willingham, & Goetz, 1997). Dans le cadre de ce chapitre, nous nous centrerons sur l'étude des habiletés perceptivo-motrices.

En résumé, malgré l'hétérogénéité des situations d'apprentissage procédural, trois caractéristiques les réunissent (Meulemans, 2000) : (1) l'apprentissage des habiletés s'acquiert de façon progressive, via un entraînement répété ; (2) la connaissance acquise en mémoire procédurale s'exprime dans l'action ; et (3) l'apprentissage conduit à une connaissance qui est automatisée et difficilement verbalisable.

MODELES D'ACQUISITION D'HABILETES PROCEDURALES

De l'explicite vers l'implicite : les modèles « top-down »

La plupart des modèles d'acquisition de nouvelles habiletés procédurales reposent sur une approche de type « top-down », ou « descendante » : les connaissances sont initialement stockées sous une forme déclarative (c'est-à-dire qu'elles peuvent être traduites sous forme d'énoncés verbaux), puis progressivement converties en connaissances procédurales.

Le processus d'apprentissage d'habiletés a généralement été décomposé en différentes étapes qualitativement distinctes ; l'intervention des processus contrôlés survenant durant les phases initiales de l'apprentissage. Avec la pratique, l'habileté devient progressivement plus automatique et donc, le recours aux processus explicites décroît. Le caractère automatique est attesté par le fait que la performance ne dépend plus de la disponibilité des ressources attentionnelles (Chauvel et al., 2012) ; en condition de double tâche, la performance procédurale n'est pas altérée (par exemple, un conducteur expérimenté n'éprouve pas de difficultés à conduire tout en tenant une conversation téléphonique importante). Selon cette conception, les tâches de mémoire procédurale impliquent successivement des processus explicites puis implicites.

Cette conception théorique a été initialement proposée par Fitts (1964; voir également Fitts & Posner, 1967) dans le domaine de l'acquisition de procédures motrices puis, plus tard, a été reprise par Anderson (dans son modèle Adaptive Control of Thought ; ACT, 1982), dans le domaine de l'acquisition de savoirs complexes (tels que les habiletés mathématiques). D'après ces modèles, le processus menant à l'automatisation se déroule en trois étapes distinctes : une étape **cognitive (ou déclarative)**, une étape **associative (ou de compilation des connaissances)** et une étape **autonome (ou procédurale)**.

Durant la première étape, les connaissances sont encodées sous la forme de connaissances déclaratives ; le sujet se base sur les instructions qui lui sont fournies sur la tâche et il les interprète à l'aide de stratégies générales de résolution de problèmes ou par l'analogie (c'est-à-dire en se référant à des situations déjà rencontrées). De nouvelles règles de production (du type « SI-ALORS ») vont ainsi être formées et stockées dans une mémoire intermédiaire (mémoire de travail) afin d'aider le sujet à accomplir la tâche. A ce stade, les connaissances sont accessibles à la conscience et

facilement verbalisables. Les traitements cognitifs sont dits « contrôlés » dans la mesure où la performance dépend largement de la disponibilité des ressources attentionnelles.

Au cours de la seconde étape, les connaissances déclaratives sont progressivement converties en connaissances procédurales grâce à un processus de compilation des connaissances : les réponses motrices appropriées sont renforcées pour former progressivement des programmes moteurs préliminaires. La performance devient plus fluide et efficace. En parallèle, les connaissances sous-jacentes à l'habileté motrice deviennent plus difficiles à verbaliser et mobilisent de moins en moins de traitements contrôlés (coûteux en attention).

Finalement, lors de l'étape procédurale, l'habileté devient plus automatisée et rapide ; elle forme ce qu'on appelle communément une « routine ». Les connaissances sont stockées dans la mémoire procédurale et deviennent difficilement verbalisables. A ce stade, la performance est principalement sous-tendue par des processus automatiques, ne dépendant plus de la disponibilité des ressources attentionnelles.

Le modèle d'Anderson a été validé par plusieurs études qui mettent en évidence l'intervention de composants cognitifs spécifiques à chacune des phases. Par exemple, Ackerman (1988; voir aussi Ackerman & Cianciolo, 2000) identifie trois processus clés qui participent chacun à une des étapes de l'apprentissage procédural : les *processus intellectuels* interviennent durant la phase cognitive de l'apprentissage ; au fur et à mesure de la pratique répétée de l'habileté, le recours à ces capacités de haut niveau diminuerait pour laisser place aux *habiletés perceptives* ; finalement, durant la phase autonome, les différences individuelles dans la performance seraient largement déterminées par les *compétences psychomotrices* des individus (rapidité et précision des réponses motrices). Une étude conduite par l'équipe d'Hélène Beaunieux (Beaunieux et al., 2006) confirme également, au travers d'une tâche d'apprentissage cognitif (la tour de Toronto), l'existence de trois phases distinctes d'apprentissage. C'est la première étude qui a démontré l'implication de la mémoire déclarative et de la mémoire de travail³ (en plus de l'intelligence générale) dans les premières phases de l'apprentissage (phase cognitive). La mémoire de travail pourrait également être encore impliquée lors de la phase associative. Les fonctions exécutives (et plus particulièrement, la flexibilité) semblent jouer un rôle durant les phases cognitive et autonome. Leurs résultats confirment également l'implication des capacités

³ La mémoire de travail est un système de capacité limitée, destiné au maintien temporaire et à la manipulation d'informations durant la réalisation de diverses tâches cognitives (Baddeley, 2000).

psychomotrices dans la phase autonome. D'autres études supportent la proposition que les processus cognitifs de haut niveau jouent un rôle important durant les phases initiales du processus d'acquisition d'habiletés (par exemple, Brosseau, Potvin, & Rouleau, 2007). Leur dysfonctionnement (par exemple dans le cadre de pathologies frontales) ou la diminution de leur capacité (dans le cadre du vieillissement normal) pourrait gêner les premières étapes de l'apprentissage ; celui-ci pourrait alors être plus lent, voire franchement perturbé (voir par exemple, Richer, Chouinard, & Rouleau, 1999). Nous décrirons plus précisément ces expériences lorsque nous aborderons l'évaluation des habiletés perceptivo-motrices (voir page 31).

Par ailleurs, des recherches menées dans le cadre d'investigations en imagerie cérébrale confirment, pour ce qui concerne les habiletés motrices, l'existence de plusieurs phases distinctes d'apprentissage. Trois étapes ont ainsi été identifiées sur base de la quantité d'amélioration de la performance au cours de l'entraînement (Doyon & Benali, 2005).

Une première phase dite « rapide » ou « **fast learning** » est caractérisée par une *amélioration très rapide* de la performance au sein d'une seule session d'apprentissage. Durant cette étape, le contrôle exécutif (incluant les régions frontales et l'hippocampe) contribue à l'apprentissage, du moins quand celui-ci est réalisé de façon explicite. Les auteurs décrivent ensuite une étape intermédiaire de **consolidation** caractérisée par une *amélioration spontanée* de la performance (qui peut être observée suite à une période de sommeil ou de veille d'au moins six heures après la première séance d'entraînement, en l'absence de pratique), mais également par une plus *grande résistance* à l'interférence. La troisième phase d'apprentissage, qualifiée de « lente » ou « **slow learning** », est caractérisée par une stabilisation de la performance : plusieurs sessions d'entraînement sont alors nécessaires pour obtenir des améliorations supplémentaires et aboutir à l'automatisation et au maintien à long terme de cette nouvelle habileté motrice.

En résumé, les modèles décrits ci-dessus ainsi que les études qui les étayent démontrent que le processus d'acquisition d'habiletés procédurales bascule progressivement, au fil d'une pratique répétée, d'une connaissance déclarative vers une connaissance procédurale, implicite, automatisée et difficilement verbalisable. Ce processus se déroule en plusieurs phases distinctes et se caractérise, en début d'apprentissage, par la prise de conscience explicite par le sujet des principales variables en jeu ; l'encodage en mémoire procédurale dépend donc de l'intervention de

nombreux composants cognitifs. L'habileté n'est réalisée de façon autonome (implicite) qu'à partir du moment où la procédure est totalement automatisée.

De l'implicite vers l'explicite : les modèles « bottom-up »

Si l'approche top-down est la plus répandue, quelques travaux dans le domaine de l'apprentissage procédural ont remis en question l'idée que l'acquisition d'habiletés se déroule nécessairement d'un mode explicite vers un mode implicite. Ces études proposent une conception « bottom-up », démontrant qu'il est possible d'acquérir des habiletés complexes sans développer une connaissance déclarative préalable (Karmiloff-Smith, 1992; Liao & Masters, 2001; Sun, Merrill, & Peterson, 2001). En d'autres termes, cette conception théorique propose que la connaissance déclarative puisse émerger de la connaissance procédurale. Par exemple, en psychologie du développement, Karmiloff-Smith (1992) propose que, durant l'enfance, les représentations implicites de bas niveaux sont transformées en représentations explicites, accessibles à la conscience. Nous reverrons ce modèle dans le chapitre 3, dédié au développement de la mémoire procédurale chez l'enfant.

Le modèle théorique bottom-up le plus intégré est le modèle connexionniste CLARION (Connectionist Learning with Adaptive Rule Induction ON-line), développé par le groupe de recherche dirigé par Ron Sun (Sun et al., 2001). L'innovation principale de CLARION est que certaines habiletés se développent d'abord sous une forme procédurale, dans des situations où les connaissances a priori ne sont pas fournies (comme c'est le cas dans des tâches qui se prêtent moins à l'apprentissage explicite, comme par exemple pour les grammaires artificielles⁴, ou pour des situations impliquant l'apprentissage d'habiletés de faible complexité). Les connaissances déclaratives explicites n'apparaissent que plus tard, une fois que l'habileté est au moins partiellement développée. Une caractéristique importante de CLARION est la distinction entre les processus implicites et explicites, assez proche de la distinction faite par Anderson (1982) entre mémoire procédurale et déclarative. Selon Sun, l'apprentissage d'habiletés pourrait suivre deux modes d'acquisition : l'un qui serait implicite (c'est-à-dire le niveau « bottom » au sein duquel les connaissances sont encodées sous une forme implicite), et l'autre explicite (ou « top », où les

⁴ Pour une définition, voir page 17, *Encart 2*.

connaissances sont encodées sous une forme explicite). La modification des paramètres de la tâche pourrait avoir une incidence sur la voie d'apprentissage empruntée par le sujet. Ainsi, l'introduction d'une tâche secondaire a pour effet de limiter le recours aux processus explicites pour traiter la tâche principale, ce qui a pour effet de forcer le passage vers la voie d'apprentissage implicite. A l'inverse, inciter les participants à verbaliser les stratégies utilisées au cours de la réalisation de la tâche favorise un apprentissage plus explicite.

Les travaux dirigés par Rich Masters (1992; pour une revue, voir Masters & Poolton, 2012) démontrent qu'une habileté motrice typiquement procédurale (à savoir l'acquisition du « putt⁵ » au golf) peut être acquise indépendamment des connaissances déclaratives, c'est-à-dire de manière implicite. Ici, l'apprentissage implicite n'est pas « incident » dans le sens donné par Seger (1994). En effet, les sujets sont conscients qu'ils se trouvent dans une situation d'apprentissage dont le but est connu. L'apprentissage *moteur* implicite est défini par Masters comme l'acquisition d'une habileté, sans accumulation correspondante de connaissances ou de règles explicites. Cette définition permet ainsi la réconciliation entre l'apprentissage procédural et implicite ; ici le terme « implicite » se réfère à l'idée que l'apprentissage se déroule d'une façon automatique, c'est-à-dire sans recourir à des stratégies conscientes ; par contre, elle n'exclut pas le fait que le sujet puisse être conscient qu'il est dans une situation d'apprentissage. La caractéristique de ce processus implicite est qu'il n'implique pas ou très peu de ressources attentionnelles et peut donc être réalisé normalement en présence d'une tâche cognitive concurrente (Shanks, 2003). Selon la conception théorique de Masters, la mémoire de travail est un médiateur de l'apprentissage procédural ; l'apprentissage est explicite quand la mémoire de travail est activée, mais il est principalement implicite quand la mémoire de travail n'est pas disponible. Ces auteurs postulent ainsi l'existence de deux processus indépendants pour l'apprentissage procédural d'une nouvelle habileté : le premier processus nommé « explicite » ou « dépendant de la mémoire de travail » est décrit comme étant le mode d'apprentissage par défaut, que le sujet utilise de manière spontanée quand aucune contrainte n'est imposée au moment de l'apprentissage. L'apprentissage explicite

⁵ Coup spécifique au golf pour de courtes distances qui consiste à amener la balle dans le trou en la faisant rouler.

donne accès à des connaissances déclaratives, conscientes et verbalisables, qui agissent sur la performance. Le second mode d'apprentissage, dit « implicite » ou « indépendant de la mémoire de travail », utilise des mécanismes procéduraux, lesquels sont appliqués automatiquement. Ce modèle postule donc que l'apprentissage peut être, dans certaines conditions, implicite. Pour forcer cette voie d'apprentissage, Masters (1992) demande aux participants d'apprendre l'habileté motrice de putt au golf en réalisant simultanément une tâche interférente (tâche de génération aléatoire de lettres). Cette tâche secondaire occupe les ressources en mémoire de travail afin d'empêcher le sujet d'accumuler des connaissances explicites. Les résultats mettent en évidence une amélioration de la performance malgré l'imposition d'une tâche secondaire (qui occupait les ressources attentionnelles). Ces résultats sont un exemple, parmi tant d'autres, du fait que l'apprentissage moteur peut se réaliser sans la formation de connaissances explicites. L'équipe de Masters démontre également que certaines méthodes expérimentales peuvent favoriser ce mode d'apprentissage, telles que l'apprentissage sans erreur⁶ (Maxwell, Masters, Kerr, & Weedon, 2001), l'apprentissage par analogie⁷ (Liao & Masters, 2001) ou des situations de feedback réduit⁸ (Maxwell, Masters, & Eves, 2003). Toutes ces méthodes d'apprentissage minimisent le recours à des traitements cognitifs contrôlés. De manière tout à fait intéressante, ces travaux montrent également que le système d'apprentissage *moteur* implicite est un système robuste, qui résiste aux situations de stress psychologique, contrairement au système d'apprentissage explicite (par exemple, Mullen, Hardy, & Oldham, 2007), ainsi qu'à une situation de tâche interférente (par exemple, Maxwell et al., 2003).

L'existence d'un système d'apprentissage inconscient, indépendant des processus explicites, a également été largement démontrée dans le domaine de l'apprentissage

⁶ L'apprentissage sans erreur consiste à éviter au maximum la production d'erreurs par le sujet (par exemple, en commençant par des situations simples et en augmentant progressivement la difficulté).

⁷ L'apprentissage par analogie consiste à guider le sujet dans sa performance motrice en privilégiant les instructions qui reposent sur des analogies (par exemple, dans les méthodes d'apprentissage moteur : « Pour effectuer un lancer franc au basket-ball, essayez de faire comme si vous deviez déposer un biscuit dans une corbeille placée sur une étagère au-dessus de votre tête »).

⁸ Dans cette condition, les sujets ne bénéficiaient d'aucun feedback visuel et auditif sur leur performance motrice afin d'empêcher l'accumulation de connaissances déclaratives. Par ailleurs, les participants devaient réaliser une tâche de recherche visuelle entre les essais afin d'occuper leurs ressources en mémoire de travail.

implicite (voir *Encart 2*, ci-dessous, pour une description détaillée de la notion d'apprentissage implicite). En effet, il existe toute une série de situations expérimentales qui prouvent que l'on peut apprendre des régularités, parfois complexes, sans pouvoir les verbaliser, ni même, souvent, sans en prendre conscience.

En résumé, l'ensemble de ces données proposent une vision alternative à l'approche top-down en démontrant que l'acquisition d'une nouvelle habileté, même complexe, peut être, dans certaines circonstances, sous-tendue par des mécanismes implicites dès le début de l'apprentissage.

Encart 2 : Apprentissage implicite

L'acquisition par l'enfant de sa langue maternelle est souvent citée comme exemple d'apprentissage implicite. Il montre la capacité exceptionnelle de l'être humain à détecter et à intégrer, à son insu, des régularités complexes présentes dans son environnement.

En effet, au travers d'une exposition répétée à la langue pratiquée par ses parents, l'enfant intègre progressivement les caractéristiques et les régularités présentes dans cette langue. Cet apprentissage se passe « naturellement », sans aucune intention consciente d'apprendre et sans que l'enfant puisse verbaliser ce qu'il apprend exactement (c'est en particulier le cas pour les règles syntaxiques de la langue). Le jeune enfant produit ainsi des phrases grammaticalement correctes alors que ces règles ne lui ont pas encore été enseignées.

Le concept d'apprentissage implicite émerge dans les années soixante, au départ des travaux d'Arthur Reber qui s'interroge sur les mécanismes sous-tendant l'acquisition d'une langue naturelle. S'inspirant des travaux de George Miller, il développe le paradigme de grammaire artificielle⁹ et fournit, en 1967, la première démonstration de l'existence d'un apprentissage inconscient et incident, c'est-à-dire implicite. D'autres travaux, notamment ceux conduits par Broadbent (1977) sur les tâches d'interaction avec des systèmes dynamiques¹⁰, puis par Nissen

⁹ Cet apprentissage consiste, dans une première phase, à présenter des chaînes de consonnes (régies par une mini-grammaire qui définit l'ordre possible de ces lettres). L'apprentissage était dit « incident » dans le sens où les sujets n'étaient pas informés de la présence de ces règles. Dans une seconde phase, les sujets sont informés du fait que les séquences de lettres ont été formées en respectant un ensemble de règles (c'est-à-dire une grammaire). Ils ont alors pour tâche de juger de la grammaticalité de nouvelles séquences de lettres (détecter si ces nouvelles chaînes respectent ou non les règles de la grammaire). L'apprentissage implicite est attesté par le fait que les sujets peuvent classer ces chaînes avec un taux de réussite supérieur à celui du hasard, bien qu'ils soient incapables de verbaliser les règles sur lesquelles ils fondent leurs jugements.

¹⁰ Dans ce paradigme d'apprentissage implicite, les individus doivent apprendre à contrôler un environnement simulé par l'ordinateur. Par exemple, la tâche peut être de contrôler les transports urbains d'une ville fictive.

et Bullemer (1987) sur le paradigme du temps de réaction sériel¹¹, ont également participé au développement du concept d'apprentissage implicite tel qu'il est connu actuellement. Le point commun à ces trois situations expérimentales est de confronter les sujets à un environnement structuré par un ensemble de règles (Perruchet & Nicolas, 1998).

Bien qu'il n'existe pas de réel consensus sur sa définition, le concept d'apprentissage implicite renvoie généralement aux formes d'apprentissage qui opèrent de façon incidente (c'est-à-dire, à l'insu du sujet) (e.g., Cleeremans & Dienes, 2008; Seger, 1994; voir aussi Meulemans, 2000). Il concerne les situations au sein desquelles le comportement d'un sujet devient sensible à certaines régularités de son environnement (Cleeremans & Dienes, 2008; Perruchet & Nicolas, 1998). La notion d'apprentissage implicite est aussi souvent associée au terme « inconscient », dans le sens où la connaissance acquise est difficilement accessible à la conscience ou exprimable verbalement (Meulemans, 2000). Toutefois, Perruchet et Vinter (1998), quant à eux, ne considèrent pas cet élément comme étant un critère déterminant de l'apprentissage implicite.

Une préoccupation importante des chercheurs qui s'intéressent à l'apprentissage implicite concerne le degré de complexité des régularités que peut intégrer un sujet (par exemple, dans quelle mesure notre système cognitif est-il capable d'apprendre, de manière implicite, des régularités complexes telles que des associations conditionnelles de second ordre ou des associations probabilistes ?). Nous développerons ce point dans la section consacrée au temps de réaction sériel (voir chapitre 2). Nous tenterons également de clarifier le concept d'apprentissage implicite par rapport à celui d'apprentissage procédural (voir page 21).

¹¹ Pour une description de ce paradigme d'apprentissage de régularités perceptivo-motrices, voir le chapitre 2.

Apprentissage explicite et implicite : vers une interaction

Au sein de cette approche bottom-up, de récents travaux dans le domaine de l'apprentissage moteur suggèrent que les systèmes explicite et implicite peuvent agir en parallèle (en opposition à un déroulement « en étapes ») et ce, dès le début de l'apprentissage (Gentile, 1998; Masters & Maxwell, 2004; Sanchez & Reber, 2013; Song, Marks, Howard, & Howard, 2009; Sun, Slusarz, & Terry, 2005; Willingham & Goedert-Eschmann, 1999). Bien qu'une série d'études démontrent que les connaissances explicites et implicites peuvent, dans certaines circonstances, se développer indépendamment l'une de l'autre, ces auteurs postulent que, dans la plupart des situations (notamment les situations de la vie réelle), ces deux processus interagissent dès le début de l'apprentissage (par exemple, Sun et al., 2005).

Par exemple, l'apprentissage par l'enfant du laçage de ses chaussures implique des mécanismes explicites (instructions verbales telles que « on commence par faire deux boucles, puis...»), mais, en parallèle, via l'entraînement, des mécanismes implicites vont également soutenir l'apprentissage (en gérant les différents paramètres de contrôle moteur nécessaires pour une performance de qualité) (Penhune & Steele, 2012).

Sur le plan expérimental, l'interaction entre les processus implicites et explicites a notamment été démontrée dans le domaine de l'apprentissage implicite. Les instructions explicites concernant l'information à acquérir (données avant la phase d'apprentissage implicite) pourraient faciliter ou au contraire entraver la performance (A. Cohen, Ivry, & Keele, 1990; Fletcher et al., 2005; Stefaniak, Willems, Adam, & Meulemans, 2008). L'effet délétère des mécanismes explicites sur l'apprentissage implicite peut se produire dans certaines circonstances, par exemple lorsque l'information à acquérir est trop complexe et/ou dans le cas d'une réduction des ressources cognitives (D. V. Howard & Howard, 2001).

Sans entrer dans des débats théoriques qui dépassent largement le cadre de ce travail de thèse, précisons toutefois que, dans le domaine de l'apprentissage implicite, l'existence d'une interaction entre les processus implicites et explicites ne fait pas l'unanimité. Récemment, Sanchez et Reber (2013) ont exploré les relations entre l'apprentissage implicite et la connaissance explicite à l'aide de la tâche de « serial interception sequence learning¹² » (SISL; Sanchez, Gobel, & Reber, 2010), une version

¹² Dans cette tâche, 4 cercles sont alignés horizontalement en bas de l'écran ; ces 4 cercles, dessinés en pointillés, représentent les cibles. Quatre indices circulaires (représentés par des ronds noirs) se déplacent verticalement (de haut en bas) vers une des quatre zones où se trouvent les quatre cibles.

modifiée de la tâche de temps de réaction sériel qui conduit à un apprentissage implicite robuste. Les auteurs montrent que le fait de fournir des connaissances explicites sur la séquence répétée avant la phase d'entraînement ne permet pas d'améliorer le taux d'apprentissage. Leurs résultats, comme d'autres précédemment (voir par exemple, Song et al., 2009; Willingham & Goedert-Eschmann, 1999), plaident en faveur de deux processus, implicite et explicite, indépendants, mais pouvant être acquis en parallèle ; la connaissance explicite pourrait ne pas avoir d'impact direct sur la performance motrice, mais sous-tendrait plutôt la performance dans des tests évaluant les connaissances explicites. Selon ce point de vue, la connaissance explicite ne contribuerait pas directement à l'apprentissage ; elle refléterait une connaissance concomitante stockée dans un système de mémoire séparé.

Finalement, Willingham (1998; dans son modèle "control-based learning theory" - COBALT) propose une théorie neuropsychologique spécifique au domaine de l'apprentissage d'habiletés motrices centrée sur l'idée qu'une tâche motrice peut être réalisée soit dans un mode *conscient* (« effortfull mode »), soit dans un mode *inconscient* (« automatic mode »). Ces deux modes peuvent être activés à tout moment. Dans le mode conscient, qui nécessite plus d'attention, les sujets contrôlent consciemment leurs mouvements et utilisent des processus stratégiques. Par exemple, le joueur de tennis qui décide de jouer dans le coup droit de son adversaire devra sélectionner et ordonner les bons mouvements pour atteindre son but ; il effectuera alors de façon consciente le mouvement approprié. Dans le mode inconscient, les sujets sont conscients de l'objectif (but à atteindre), mais pas de la manière d'effectuer la tâche. Par exemple, une personne qui se sert un verre d'eau sera tout à fait consciente de déplacer le verre, mais les représentations spatiales qui permettent d'orienter les mouvements seront traitées de façon inconsciente. Pour Willingham, les deux modes sont disponibles à tout moment. Contrairement à la position d'Anderson (1982), le mode conscient n'est pas seulement utilisé en début d'apprentissage. En effet, même une activité automatisée peut être exécutée de manière consciente à n'importe quel moment (si le sujet décide d'engager ce mode ou, par exemple, si la tâche devient plus difficile). Par exemple, un conducteur expérimenté peut éteindre le radio pour mieux se concentrer sur une route verglacée. Le mode conscient mène

Les participants doivent appuyer sur la touche correspondante (D, K, J, F) sur le clavier au moment où l'indice atteint la cible. Ils peuvent également planifier leurs réponses suivantes en fonction de la position des trois autres indices. Cette tâche requiert des réponses très rapides. Les participants ne sont pas informés de la présence d'une séquence répétée (qui peut être composée de 30, 40, 50, ou 60 items). Cependant, la connaissance de la séquence est attestée par le fait que les participants répondent mieux aux stimuli de la séquence par rapport à des stimuli aléatoires.

généralement à une performance plus précise, mais il réclame plus d'attention que le mode inconscient.

En résumé, ces conceptions théoriques ont l'avantage de proposer une vision « plus large » des mécanismes impliqués dans l'apprentissage procédural. Les contributions relatives des mécanismes implicites et explicites dans l'acquisition d'habiletés pourraient varier en cours d'apprentissage, en fonction des demandes de la tâche (Penhune & Steele, 2012).

L'ensemble des modèles présentés ci-dessus reflètent en réalité la diversité des situations d'apprentissage en mémoire procédurale. Selon les capacités cognitives de l'apprenant, les circonstances d'apprentissage, ou encore le type de connaissance à acquérir, les mécanismes impliqués pourraient être différents ; l'idée d'un seul modèle théorique rendant compte de toutes les situations d'acquisition d'habiletés paraît encore à l'heure actuelle non seulement utopique, mais également trop restrictive.

APPRENTISSAGE IMPLICITE OU PROCEDURAL ? Une tentative de clarification

Il existe une certaine confusion dans la littérature concernant les concepts d'apprentissage procédural et d'apprentissage implicite. Certains auteurs utilisent ces deux termes de façon indifférenciée alors que, pour d'autres, il s'agit de concepts distincts. De par sa définition, l'apprentissage implicite a souvent été étudié sans faire référence à l'apprentissage procédural, et vice versa ; les deux champs d'études ont ainsi développé leurs propres paradigmes expérimentaux. Il est vrai que la définition de l'apprentissage implicite (qui insiste sur la nature « inconsciente » de la phase d'apprentissage) exclut les situations d'apprentissage procédural qui, contrairement à l'apprentissage implicite, se caractériseraient durant les premières phases, par la prise de conscience explicite par le sujet des principales variables en jeu (en se référant à la conception « top-down » de l'apprentissage procédural). En effet, pour l'acquisition d'un certain nombre d'habiletés procédurales, le sujet passe d'abord par une phase de traitement très contrôlée nécessitant la coopération de diverses fonctions cognitives. Le sujet, confronté par exemple à l'apprentissage de la conduite automobile, est non seulement tout à fait conscient qu'il est dans une situation d'apprentissage (l'apprentissage ne se fait pas à son insu), mais en plus doit manipuler de manière

explicite un certain nombre d'informations nécessaires au contrôle de son véhicule (telles que le positionnement des vitesses, par exemple).

Pourtant, l'apprentissage implicite et l'apprentissage procédural partagent certaines caractéristiques, comme le fait que la connaissance acquise soit difficilement accessible à la conscience du sujet et que les deux formes d'apprentissage s'expriment dans des situations où les sujets apprennent progressivement une forme d'habileté (qui se manifeste par une amélioration de la performance au fil de l'entraînement). La principale différence entre ces deux domaines de recherche tiendrait à la nature de la phase d'apprentissage : implicite/incidente dans le cas de l'apprentissage implicite, explicite en situation d'apprentissage procédural. Toutefois, la situation pourrait être plus complexe qu'elle n'y paraît. En effet, comme nous l'avons abordé précédemment, une série d'études démontrent qu'une connaissance pouvant typiquement faire l'objet d'un apprentissage procédural peut également être acquise de manière implicite (par exemple en demandant au sujet de réaliser une tâche distractive pendant l'acquisition de l'habileté) ; a contrario, certaines connaissances dont l'apprentissage a typiquement été étudié dans le contexte des paradigmes d'apprentissage implicite peuvent être acquises de manière explicite (par exemple en demandant au sujet de verbaliser les consignes et les différentes étapes d'acquisition ; voir Sun et al., 2001). L'apprentissage procédural est donc un système assez complexe qui, selon les situations, peut impliquer divers processus et emprunter soit une voie plus implicite, soit une voie plus explicite (e.g., Willingham, 1998). Illustrons notre propos en reprenant l'exemple concret de la conduite automobile, mais cette fois en imaginant que l'apprentissage se fait à l'aide d'une simulation à travers un jeu vidéo. Dans ce cas précis, on pourrait concevoir que l'apprentissage puisse se faire de manière moins contrôlée et moins explicite ; le sujet peut manipuler le volant et les pédales sans trop se préoccuper des erreurs de conduite qu'il commet, ce qui n'est pas envisageable en situation de conduite réelle, où la moindre fausse manœuvre peut être lourde de conséquences.

En résumé, le phénomène d'apprentissage implicite semble avoir une place dans l'étude de la mémoire procédurale. Sur un plan expérimental, le type de situations, les consignes données au sujet, mais également le fait de modifier certains paramètres de

la tâche (double tâche *versus* verbalisation), sont autant de facteurs susceptibles de déterminer le type de mécanismes (implicites *versus* explicites) par lequel se fera l'apprentissage d'une nouvelle habileté.

Dans le cadre de ce travail de thèse, nous prenons le parti de ne pas considérer, a priori, l'apprentissage implicite et l'apprentissage procédural comme deux phénomènes distincts. Nous préférons utiliser le terme générique d'apprentissage procédural pour faire référence au processus d'acquisition d'habiletés, englobant à la fois les situations classiques d'apprentissage procédural (telles que décrites par Anderson, 1982) ainsi que les situations dites d'apprentissage implicite.

CHAPITRE 2

ACQUISITION D'HABILETES PROCEDURALES PERCEPTIVO- MOTRICES : PARADIGMES EXPERIMENTAUX

Les recherches qui étudient la mémoire procédurale classent généralement les tâches d'apprentissage perceptivo-moteur en deux catégories (Doyon & Benali, 2005; Willingham, Koroshetz, & Peterson, 1996) : l'adaptation perceptivo-motrice et l'apprentissage de séquences perceptivo-motrices. Après une présentation de ces deux types d'apprentissage, nous décrivons les mécanismes cognitifs et les circuits neuronaux qui sont impliqués dans chacun d'eux.

ADAPTATION PERCEPTIVO-MOTRICE

L'adaptation perceptivo-motrice concerne l'apprentissage de nouvelles associations entre des indices visuels et des réponses motrices. Ce type de tâche mesure la capacité d'une personne à adapter ou à modifier ses mouvements en vue de compenser des changements de l'environnement. L'épreuve de dessin en miroir est

une des tâches de référence dans cette catégorie. Les participants ont pour consigne de tracer le contour d'une forme géométrique (par exemple, une étoile) sur une feuille, mais en ne voyant leur production qu'au travers d'un miroir. Les premiers essais sont souvent laborieux, donnant lieu à une réalisation lente et très imprécise. L'apprentissage de l'habileté de dessin en miroir se manifeste par l'amélioration de la performance au fil des essais en termes de temps et d'erreurs. Généralement, un essai dit « de transfert » est administré à la fin de la phase d'apprentissage ; celui-ci consiste à présenter une figure différente de celle qui a été proposée durant l'entraînement. Il s'agit de tester la capacité de généralisation, c'est-à-dire la capacité à appliquer l'habileté apprise à une situation différente de celle qui a été entraînée ; pour Seidler (2007), c'est un indicateur que l'habileté procédurale a bien été apprise (c'est-à-dire que le sujet n'a pas simplement appris le mouvement spécifique qui a été répété durant les essais d'entraînement). Des variantes de la tâche de dessin en miroir ont été proposées. Par exemple, dans une version informatisée, les sujets doivent atteindre des cibles sur un écran d'ordinateur à l'aide d'un joystick, dans une condition où la scène visuelle a fait l'objet d'un retournement de 180° (Doyon et al., 2009). Ainsi, tout mouvement du joystick en haut à gauche entraîne un déplacement du curseur en bas à droite, et vice versa. Les tâches d'adaptation prismatique peuvent également être incluses dans cette catégorie. Cette épreuve consiste généralement en une déviation de l'environnement visuel par le port de prismes optiques. Par exemple, si le sujet porte des prismes déviant l'environnement de 20° à droite, lorsqu'il effectue un mouvement de pointage vers une cible visuelle, son mouvement est dévié de 20°. Le sujet prend généralement conscience de son erreur lorsqu'il atteint la cible. Avec l'entraînement (c'est-à-dire, la répétition des mouvements de pointage), il corrige progressivement son erreur, montrant ainsi son adaptation à la nouvelle situation.

APPRENTISSAGE DE SEQUENCES PERCEPTIVO-MOTRICES

L'apprentissage séquentiel se réfère à l'habileté à combiner des mouvements isolés dans une séquence qui sera produite avec aisance à la suite d'une pratique répétée (Doyon et al., 2011). L'apprentissage de séquences peut être étudié au travers de différents types de tâches (par exemple, la tâche des mouvements de mains, KABC-II ; la tâche de dextérité d'appuis digitaux, Karni et al., 1995). Toutefois, l'utilisation de la majorité de ces tâches s'inscrit dans le cadre de l'étude de formes explicites

d'apprentissage, ou encore dans le contexte de la mémoire de travail. Dans le cadre de ce travail, qui se focalise sur l'automatisation de connaissances séquentielles, nous avons choisi d'explorer cette forme d'apprentissage au travers du paradigme de temps de réaction sériel (TRS; Nissen & Bullemer, 1987), qui est actuellement le plus utilisé pour investiguer l'apprentissage procédural chez l'enfant. Dans cette tâche, les sujets doivent répondre aussi rapidement que possible à des stimuli (souvent un point ou une croix) apparaissant à différentes localisations (le plus souvent, quatre localisations disposées en ligne) sur un écran d'ordinateur, en pressant sur la touche correspondante (voir Figure 1A). Classiquement, les sujets doivent répondre en positionnant l'index et le majeur de chaque main sur les touches du clavier qui correspondent spatialement aux positions des cibles sur l'écran. Ce dispositif implique d'apprendre une association entre la position de la cible sur l'écran (le stimulus) et la touche réponse correspondante (la réponse). Comme nous le verrons dans le chapitre suivant, l'utilisation du clavier d'ordinateur peut représenter une charge cognitive et/ou motrice ; des variantes, utilisant par exemple un écran tactile, ont donc été proposées (voir par exemple, Gabriel, Maillart, Guillaume, Stefaniak, & Meulemans, 2011).

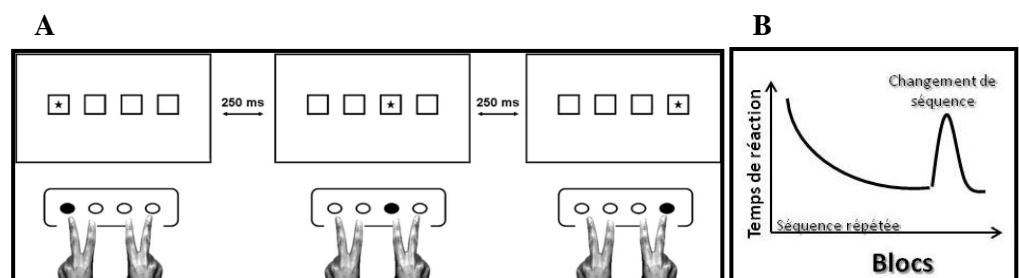


Figure 1. (A) Dispositif pour une tâche de TRS (image tirée de Gheysen, Van Waelvelde, & Fias, 2011) et (B) mesure de l'apprentissage d'une séquence dans une version de la tâche de TRS.

Dans tous les cas, le stimulus-cible se déplace sur les différentes localisations suivant une séquence particulière (comportant par exemple 10 stimuli : 4-2-3-1-3-2-4-3-2-1, les chiffres 1, 2, 3, et 4 désignant les positions à l'écran, de la gauche vers la droite) qui se répète à travers plusieurs blocs d'apprentissage (un bloc pouvant par exemple contenir 10 répétitions de la séquence). L'apprentissage est mis en évidence par une amélioration de la vitesse de réponse au cours des essais et, plus spécifiquement, par des temps de réaction plus courts pour la séquence apprise que pour une nouvelle

séquence (composée de stimuli apparaissant de manière pseudo-aléatoire ; voir Figure 1B pour une illustration). Le TRS implique donc à la fois un apprentissage de type « stimulus-réponse » (qui se caractérise par le fait que le sujet devient, avec la pratique, de plus en plus habile à répondre aux stimuli), et un apprentissage d'associations « stimulus-stimulus » (qui concerne l'apprentissage des régularités présentes au sein même de la séquence). Bien qu'il puisse se réaliser de façon explicite (avec une connaissance préalable de la séquence motrice à exercer), cet apprentissage a généralement lieu de façon implicite et incidente (à aucun moment le sujet n'est informé de la présence d'une séquence, ni même qu'il se trouve dans une situation d'apprentissage).

Comme nous l'avons décrit dans le chapitre précédent (*Encart 2*), dans le domaine de l'apprentissage implicite, l'intérêt principal des études porte sur le degré de complexité des séquences. En effet, l'apparition des stimuli dans une séquence peut être régie par une série de règles plus ou moins complexes. Par exemple, la localisation d'un élément peut être prédite par des relations conditionnelles de premier ordre ; on parle dans ce cas de séquences FOC (pour first-order conditional; Reed & Johnson, 1994) pour lesquelles chaque localisation est prédite de manière certaine par l'élément précédent¹³. Il existe également des séquences de second ordre (les séquences SOC, pour second-order conditional; Reed & Johnson, 1994) pour lesquelles chaque localisation est complètement déterminée par les deux localisations précédentes¹⁴. Ainsi, la connaissance de la localisation précédente ne suffit pas pour prédire la prochaine localisation. Enfin, certaines séquences sont dites « ambiguës ». Il s'agit de séquences composées entièrement de relations conditionnelles de second ordre, mais dans lesquelles chaque position peut être prédite par les éléments qui la précèdent avec une certaine probabilité¹⁵. Toutes ces séquences sont dites « déterministes » car les éléments peuvent être prédits par un ou plusieurs éléments de manière univoque. Des variantes probabilistes ont également été développées. Il s'agit de séquences dans lesquelles des irrégularités sont introduites. Dans ce type de séquence, un

¹³ Par exemple, dans la séquence 1-3-2-4-1-3-2, 1 est toujours suivi de 3, 3 est toujours suivi de 2, etc.

¹⁴ Par exemple, dans la séquence 1-3-2-3-1-2, si 3 est précédé de 1, alors il sera suivi de 2 et si 3 est précédé de 2, alors il sera suivi de 1.

¹⁵ Ainsi, dans la séquence ambiguë 4-2-1-3-2-4-3-1, si 3 est précédé de 1, alors il sera suivi de 2. Cependant, dans 50% des cas, 3 sera précédé soit de 1, soit de 4, mais jamais de 2.

élément de cette dernière ne peut être prédit de manière certaine par les éléments qui le précèdent¹⁶.

COMPARAISON DES DEUX PARADIGMES D'APPRENTISSAGE

Caractéristiques de l'information acquise

L'apprentissage d'habiletés perceptivo-motrices est le processus par lequel des mouvements, produits seuls ou en séquence, deviennent plus fluides au travers d'une pratique répétée de la tâche (Willingham, 1998). Dans les deux types de tâches (apprentissage de séquences *versus* adaptation), l'apprentissage conduit à une connaissance procédurale, automatisée, qui s'exprime dans l'activité du sujet et qui est difficilement verbalisable. Toutefois, un certain nombre de caractéristiques les distinguent.

Ainsi, dans la tâche de temps de réaction sériel, l'objectif n'est pas d'acquérir une habileté motrice **généralisable**, mais plutôt une connaissance structurelle qui est directement dépendante du matériel entraîné. Dans ce cas, il s'agit d'un apprentissage de type « **séquence-spécifique** » ; la connaissance de la séquence apprise n'est d'aucune aide pour la vitesse de réponse à une autre séquence, non apprise : il n'y a pas de transfert d'une séquence vers une autre. La situation est toute différente pour le paradigme du dessin en miroir, pour lequel un transfert à de nouvelles situations est envisageable (Willingham, Koroshetz, & Peterson, 1996). En effet, le sujet entraîné par exemple à la tâche de dessin en miroir avec une forme X, pourra tout à fait produire une forme Y de manière efficace et relativement fluide parce qu'il a appris une habileté, celle de dessiner au travers d'un miroir. En définitive, ce n'est peut-être pas le caractère implicite *versus* explicite de l'apprentissage qui détermine le degré de flexibilité, mais plutôt la nature de la connaissance à apprendre. Si on doit apprendre une connaissance structurelle finie (une séquence déterministe, par exemple, ou une grammaire artificielle), il n'y a aucune raison qu'on s'attende à une connaissance « flexible », qui pourrait se généraliser à d'autres séquences ou à d'autres structures (et ce, que l'apprentissage ait été explicite ou implicite).

¹⁶ Dans une séquence probabiliste, la localisation de la cible suit une règle statistique. Par exemple, les transitions 1-4 sont suivies par la position 3 avec une probabilité de 0.90, ou par la position 2 avec une probabilité de 0.10.

Une autre manière de différencier ces deux tâches est la distinction proposée par Gabrieli et al. (1997) entre les habiletés en « boucle fermée » et celles en « boucle ouverte » (cette distinction repose sur le caractère prévisible ou non de l'environnement). Ainsi, les tâches d'adaptation motrice (par exemple, le dessin en miroir) constitueraient un apprentissage en **boucle fermée**, car le sujet reçoit un feedback externe continu sur sa performance et sur ses erreurs de mouvements ; il a la possibilité de s'arrêter à tout moment afin de corriger ses erreurs de programmation de mouvements et d'adapter ainsi son contrôle moteur. La connaissance du résultat est continue et immédiate. A l'inverse, les tâches impliquant l'apprentissage d'une séquence de mouvements (par exemple le temps de réaction sériel) impliqueraient quant à elles un apprentissage en **boucle ouverte** ; ce type de tâche requiert de répondre à une cible future dont la position peut être prédite par les éléments précédents. Vu la rapidité de déplacement des stimuli, le sujet se voit dans l'incapacité d'utiliser des feedback visuels immédiats pour adapter son contrôle moteur et rectifier ses erreurs. Dans ce cas, la connaissance des résultats est différée.

Enfin, un élément essentiel qui distingue ces deux situations d'apprentissage est la nature séquentielle de l'apprentissage. En effet, des dissociations ont été rapportées entre des situations d'apprentissage qui ne se différenciaient que par la nature **séquentielle versus aléatoire** du matériel à apprendre. Par exemple, Willingham et al. (1996) ont conduit une expérience destinée à tester, chez des patients avec la maladie de Huntington¹⁷, deux versions d'une tâche de poursuite d'une cible (i.e., tracking task) dans laquelle le sujet doit pister au moyen d'un joystick une cible qui se déplace. Dans la première tâche, la cible se déplaçait de façon aléatoire ; les participants devaient simplement apprendre la relation entre le joystick et la cible sur l'écran d'ordinateur. Les auteurs montrent, dans ce cas, un apprentissage procédural tout à fait normal chez leurs patients. Dans la seconde tâche, la cible se déplace selon un pattern séquentiel ; les participants pouvaient alors améliorer leur vitesse de réponse en apprenant cette séquence de mouvements. Leurs résultats montrent que les patients Huntington présentent un déficit spécifique dans l'apprentissage séquentiel, lequel serait relié à un

¹⁷ La maladie de Huntington (ou chorée de Huntington) est caractérisée par des altérations neuronales au niveau du noyau caudé et du putamen (striatum).

dysfonctionnement au niveau du striatum¹⁸. La nature séquentielle de la réponse est donc une des dimensions pertinentes pour distinguer ces deux types de tâches perceptivo-motrices.

Mécanismes impliqués dans l'apprentissage procédural

Les tâches d'**adaptation perceptivo-motrice** sont classiquement considérées comme « explicites » car les participants « savent » dès le début qu'ils doivent acquérir une nouvelle habileté (l'apprentissage n'est pas incident, comme dans le cas du TRS). Plusieurs études soulignent l'intervention des processus exécutifs durant les phases initiales de l'apprentissage. Par exemple, Kennedy, Partridge et Raz (2008) montrent que la mémoire de travail est impliquée dans l'apprentissage de la tâche de dessin en miroir et pourrait, en partie, expliquer la dégradation observée chez les sujets âgés dans ce type d'apprentissage. Par ailleurs, le rôle de la mémoire de travail visuo-spatiale dans les phases précoces de l'apprentissage d'une tâche d'adaptation perceptivo-motrice a également été récemment démontré (Anguera, Reuter-Lorenz, Willingham, & Seidler, 2010; Langan & Seidler, 2011). Par ailleurs, les fonctions exécutives, et plus particulièrement les capacités d'inhibition¹⁹, ont fait l'objet d'une attention particulière. Selon Brosseau et al. (2007), la tâche de dessin en miroir serait particulièrement sensible aux déficits d'inhibition qui apparaissent dans certaines pathologies neurodégénératives (telles que la maladie d'Alzheimer) ou au cours du vieillissement normal. En effet, une particularité de la tâche de dessin en miroir, contrairement à d'autres tâches perceptivo-motrices, est qu'elle nécessite de modifier une association sur-apprise entre la vision et le comportement moteur ; la personne doit ainsi aller à l'encontre de ses automatismes pour réaliser la tâche. Cette composante « exécutive » a été confirmée par plusieurs études. Par exemple, dans une expérience menée auprès de patients Alzheimer, Rouleau, Salmon et Urbancic (2002) rapportent qu'un sous-groupe de patients était incapable de réaliser les premiers essais de la tâche de dessin en miroir (qui consistait à tracer de simples lignes verticales et horizontales) alors que les autres patients parvenaient à apprendre cette habileté aussi bien que les sujets contrôles. Pourtant, ces deux groupes de sujets

¹⁸ Le rôle du striatum dans l'apprentissage procédural sera abordé à la fin de ce chapitre.

¹⁹ L'inhibition est définie ici comme une fonction de suppression de représentations ou de processus préalablement activés (Harnishfeger, 1995).

Alzheimer ne se différencient pas en termes de sévérité de la démence. Les auteurs mettent par contre en évidence que les patients exclus de l'étude en raison de leurs difficultés initiales à la tâche procédurale, présentaient de moins bonnes capacités exécutives. L'importance de ces fonctions de contrôle dans ce type de tâche a été confirmée auprès de patients présentant un déclin dans les fonctions exécutives consécutif au syndrome d'apnée du sommeil (Rouleau, Décary, Chicoine, & Montplaisir, 2002). Les patients présentant des lésions du cortex frontal ont également plus de difficultés dans les phases initiales de la tâche (Richer et al., 1999). Enfin, des études en neuro-imagerie renforcent ces observations, confirmant le rôle du cortex préfrontal au cours du processus d'adaptation perceptivo-motrice (Anguera, Russell, Noll, & Seidler, 2007; Kennedy & Raz, 2005; Shadmehr & Holcomb, 1999).

Considérés dans leur ensemble, ces résultats suggèrent que la tâche de dessin en miroir est particulièrement sensible à une atteinte du cortex frontal et aux déficits exécutifs associés. Toutefois, malgré des difficultés initiales, la plupart de ces études montrent que la performance s'améliore avec la pratique répétée de la tâche (par exemple, Brosseau et al., 2007). Les difficultés présentes en début de tâche, qui peuvent être liées à une diminution des capacités exécutives, n'empêcheraient pas l'apprentissage procédural en tant que tel ; les difficultés présentes en début d'apprentissage peuvent même totalement disparaître au fil des essais (voir par exemple, Richer et al., 1999), mais ce dernier résultat n'a pas été retrouvé dans toutes les études (par exemple, Chouinard, Rouleau, & Richer, 1998 montrent, chez des sujets frontaux, la persistance de difficultés à la fin de la phase d'apprentissage malgré qu'ils se soient améliorés au fil des essais)

Une approche intéressante permettant de tester la nature des mécanismes sous-tendant l'apprentissage procédural est le paradigme de double tâche. Celui-ci se définit par la réalisation simultanée de deux tâches, l'une dite 'principale' et l'autre dite 'secondaire' (Abernethy, 1988). L'introduction d'une tâche secondaire, dite « interférente », a pour effet d'utiliser une partie des ressources cognitives. L'interférence a lieu lorsque la tâche principale sollicite les mêmes processus

(perceptifs, cognitifs, et/ou moteurs) que la tâche secondaire²⁰. Ainsi, dans les situations d'apprentissage procédural, l'interférence entre les deux tâches pourrait être élevée, entraînant une dégradation de la performance procédurale, si les mécanismes sous-tendant la performance reposent sur des stratégies explicites (coûteuses en ressources attentionnelles). A contrario, l'interférence entre les deux tâches pourrait être faible, voire inexistante, si la performance au cours de la tâche principale est soutenue par des mécanismes implicites, automatiques, peu (ou pas) coûteux en ressources attentionnelles. Ainsi, une étude utilise le paradigme de double tâche au cours d'un apprentissage procédural de type adaptation perceptivo-motrice (qui consistait en la poursuite d'une cible dans une condition de feedback visuel inversé ; (Eversheim & Bock, 2001). Dans cette expérience, les auteurs testent différents types de tâches interférentes afin d'identifier les processus sous-jacents à la performance procédurale. Leurs résultats mettent en évidence un effet de la tâche interférente, particulièrement en début d'apprentissage. Plus particulièrement, le pattern de résultats les amène à conclure que les ressources relatives à l'attention spatiale et aux transformations sensorielles sont particulièrement importantes en début d'apprentissage ; celles relatives au mouvement interviennent plus tard. Ces résultats sont en accord avec les modèles top-down de l'apprentissage.

Dans le paradigme de **temps de réaction sériel**, une série de chercheurs, comme nous le verrons dans les lignes qui suivent, se sont interrogés sur les mécanismes, implicites ou explicites, sous-tendant l'apprentissage. Dans la tâche, telle qu'elle est administrée de façon traditionnelle, le participant n'est pas informé de la présence d'une séquence, ce qui favorise un apprentissage de type implicite. Toutefois, le sujet peut dans certains cas développer des connaissances explicites au cours de l'apprentissage. Pour cette raison, une tâche de reconnaissance ou de génération est généralement introduite à la fin de la phase d'apprentissage afin de vérifier la présence de connaissances explicites concernant la séquence. Par exemple, dans les tâches de génération libre, il est demandé au sujet de produire la séquence de façon spontanée, ou du moins une partie de celle-ci. Il a ainsi été démontré que des connaissances

²⁰ Les performances en situation de double tâche sont expliquées par la limitation de nos capacités de traitement (Tombu & Jolicoeur, 2003). Si les deux tâches entrent en concurrence et que leur exécution « consomme » l'intégralité de ces capacités, les performances des sujets en situation de double tâche devraient chuter par comparaison avec leurs performances en situation de simple tâche.

explicites pouvaient émerger parallèlement à l'apprentissage implicite (Destrebecqz & Cleeremans, 2001). À côté du type d'instruction donnée durant la phase d'apprentissage, d'autres éléments, tels que la structure de la séquence, peuvent influencer la nature des mécanismes impliqués durant l'apprentissage. Par exemple, une séquence comportant des associations de premier ordre favorise l'émergence d'une connaissance explicite par rapport à une séquence SOC (A. Cohen et al., 1990)²¹. Une série d'études a cependant montré que, même pour les séquences SOC, les participants avaient tendance à apprendre une partie de la séquence répétée explicitement (Cleeremans & Jiménez, 1998). Cela a conduit plusieurs auteurs à introduire du « bruit » dans la séquence répétée ; par exemple en développant une version probabiliste des séquences SOC²² (Schvaneveldt & Gomez, 1998). Dès lors, il est maintenant bien établi que l'apprentissage explicite pourrait être privilégié quand les relations entre les éléments sont simples et saillantes ; au contraire, si ces relations sont plus complexes, l'apprentissage implicite devient alors prédominant. Parallèlement au développement de connaissances explicites, on peut légitimement se poser la question de l'intervention de mécanismes cognitifs, tels que par exemple ceux relevant de la mémoire de travail, pendant la tâche de temps de réaction sériel. Jiménez et Méndez (1999) explorent le rôle de l'attention dans trois expériences menées à l'aide de la tâche de TRS chez des sujets adultes sains. Les participants devaient apprendre des séquences probabilistes sous condition de simple tâche ou de double tâche (la tâche interférente consistait en une tâche de comptage de cibles²³). Leurs résultats montrent que l'apprentissage n'est pas affecté par la condition de double tâche. Les auteurs en concluent que l'apprentissage implicite (d'informations complexes) exige peu de ressources attentionnelles et peut être considéré comme relevant de processus automatiques. Cela est concordant avec la définition même de l'apprentissage implicite. Toutefois, des résultats contradictoires, démontrant un impact de la tâche interférente (qui consistait dans ce cas en une tâche d'identification de sons) sur

²¹ A contrario, un intervalle inter-stimuli court (Destrebecqz et al., 2005) ou encore l'introduction de blocs aléatoires durant l'apprentissage de la séquence (Meulemans, Van der Linden, & Perruchet, 1998) sont, quant à eux, des facteurs qui limitent le développement de connaissances explicites.

²² Par exemple, « 1-4 » pouvait être suivi par la localisation 3 dans 90% des cas et par la localisation 2 dans 10% des cas (alors que dans la séquence SOC déterministe, « 1-4 » était suivi par 3 avec une probabilité de 100%).

²³ Les « x » habituelles composant la tâche de TRS ont été remplacées par 4 symboles différents (x, *, ?, !). La tâche secondaire consiste à compter certains symboles et à en ignorer d'autres.

l'apprentissage implicite d'une séquence motrice, ont également été trouvés (voir par exemple, Frensch, Buchner, & Lin, 1994; Schumacher & Schwarb, 2009; Shanks & Channon, 2002). Actuellement, le rôle joué par l'attention et la mémoire de travail dans les tâches de TRS fait débat dans la littérature (voir pour une revue, Jiménez, 2003; Shanks, 2003). Les résultats contradictoires pourraient partiellement être expliqués par la nature de la séquence, mais également par le type et la complexité des tâches secondaires utilisées. Toutefois, plutôt que d'envisager les situations d'apprentissage implicite en termes de dichotomie implicite *versus* explicite, il semble actuellement plus opportun de considérer que les situations d'apprentissage pourraient impliquer la mise en œuvre à la fois de processus explicites (qui requièrent des ressources attentionnelles) et de processus implicites (Destrebecqz & Cleeremans, 2001; Destrebecqz et al., 2005) : leur degré d'engagement dépendrait d'un ensemble de facteurs liés à la situation d'apprentissage et au type d'informations à acquérir.

Substrats neuronaux

Une multitude de données montrent de manière assez consistante que l'acquisition d'habiletés motrices dépend de l'implication des noyaux gris centraux ou ganglions de la base (incluant le **striatum**), du **cervelet** et des régions **corticales motrices** associées²⁴ (voir par exemple, Doyon & Ungerleider, 2002; Laforce & Doyon, 2002). Ces structures forment deux circuits cortico-sous-corticaux distincts : l'un *cortico-striatal* et l'autre *cortico-cérébelleux*.

Dans le domaine de la neuropsychologie, les déficits mis en évidence auprès de patients souffrant d'une dysfonction striatale (comme c'est le cas dans les maladies de Parkinson et de Huntington), cérébelleuse ou encore des aires motrices frontales ont constitué les premiers éléments en faveur du rôle joué par ces deux circuits dans l'apprentissage procédural perceptivo-moteur (par exemple, Gabrieli et al., 1997). Conjointement aux études cliniques, l'utilisation des techniques de neuro-imagerie (telles que l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle et la tomographie par émission de positons) a largement contribué à une meilleure identification des régions

²⁴ Les régions corticales motrices incluent le cortex moteur primaire, le cortex pré-moteur dorsal et ventral, le cingulum moteur, les régions motrices supplémentaires et pré-supplémentaires, et certains territoires du cortex pariétal.

cérébrales impliquées dans l'apprentissage procédural chez l'adulte. Nous décrivons ci-dessous, de façon très synthétique, les principales régions cérébrales impliquées dans la réalisation, d'une part, des tâches d'apprentissage de séquences, et d'autre part, des tâches d'adaptation motrice. Finalement, nous présenterons un modèle de la plasticité cérébrale relié à l'apprentissage d'habiletés motrices, développé par Doyon et collaborateurs (Doyon et al., 2009; Doyon & Benali, 2005; Doyon & Ungerleider, 2002).

Adaptation perceptivo-motrice

Le cervelet a fait l'objet d'une attention particulière dans le domaine de l'adaptation motrice. Conjointement aux études cognitives réalisées auprès de patients avec atteinte du cervelet, l'utilisation des techniques de neuro-imagerie (chez des sujets adultes sains) a confirmé le rôle de cette structure cérébrale tout au long du processus d'apprentissage, de l'acquisition à la rétention à long terme (voir la revue de King, Fogel, Albouy, & Doyon, 2013).

Le cervelet agit en tant que « signal d'erreurs » ; il détecte et corrige les erreurs, permettant ainsi la formation d'un nouveau modèle interne contenant les nouvelles représentations perceptivo-motrices pertinentes pour l'action à réaliser (Penhune & Steele, 2012; voir également pour une revue complète Bernard & Seidler, 2013).

Les structures sous-corticales des noyaux gris centraux semblent également contribuer à ce type d'apprentissage procédural (voir la revue de Packard & Knowlton, 2002). En effet, des recherches chez des patients parkinsoniens ont révélé des difficultés dans les tâches d'adaptation motrice, notamment lorsque surviennent des changements abrupts sur le plan visuel (par exemple, Contreras-Vidal & Buch, 2003). Les auteurs rapportent qu'en cas de distorsions graduelles (ou dans les étapes plus tardives du processus d'adaptation), le réseau cortico-cérébelleux est particulièrement critique, alors qu'en cas de distorsions subites²⁵, c'est le réseau fronto-striatal qui est davantage impliqué.

²⁵ Dans cette expérience, les sujets ont dû s'adapter à une rotation de l'écran d'ordinateur de 90°. Leur tâche consistait à atteindre des cibles (situées à 44, 135, 225, et 315 degrés) sur l'écran à partir d'un point central en traçant un trait le plus précisément possible ; les sujets devaient ainsi effectuer des mouvements dans différentes directions.

Le cortex frontal est également impliqué dans les étapes précoces de la tâche d'adaptation ; en particulier, il permettrait l'inhibition des associations visuo-motrices antérieures (par exemple, Gentili, Bradberry, Oh, Hatfield, & Contreras Vidal, 2011; King et al., 2013 pour une revue). Plus spécifiquement, le cortex préfrontal dorsolatéral contribuerait à la phase d'essais et d'erreurs qui constituent les premières phases de l'adaptation motrice (voir pour une revue, Halsband & Lange, 2006).

Les aires temporales et pariétales joueraient également un rôle en début d'apprentissage, rôle qui, selon les auteurs, refléterait l'implication de la mémoire de travail (Gentili et al., 2011).

Apprentissage séquentiel perceptivo-moteur

Une pléthore de recherches se sont intéressées aux soubassements cérébraux de l'apprentissage d'une séquence motrice chez l'adulte (voir, pour des revues récentes, Hardwick, Rottschy, Miall, & Eickhoff, 2012; King et al., 2013; P. J. Reber, 2013). La plupart des études ont utilisé des paradigmes où la performance initiale est soutenue par une connaissance explicite de la séquence à pratiquer. Certaines études ont toutefois mis en évidence un réseau cérébral commun à l'acquisition implicite et explicite d'une nouvelle séquence motrice complexe (comprenant le striatum, le cortex préfrontal et prémoteur, ainsi que l'hippocampe²⁶ (voir par exemple, Schendan, Searl, Melrose, & Stern, 2003)

Dans le domaine de l'apprentissage implicite de séquences, une augmentation de l'activité dans les noyaux gris centraux et dans les aires relatives à la planification motrice est généralement rapportée (voir Peigneux et al., 2000). Une récente étude, menée auprès de patients avec maladie de Parkinson, confirme l'idée que le réseau fronto-striatal est critique pour l'apprentissage implicite d'une séquence (Meier et al., in press).

Le rôle du cervelet dans l'apprentissage séquentiel est plus controversé, mais des études récentes démontrent qu'il serait également critique dans les phases précoces de l'apprentissage de séquences (pour une revue, voir King et al., 2013).

²⁶ Cette activité au niveau de l'hippocampe n'est sans doute pas une condition nécessaire ou suffisante pour que l'apprentissage ait lieu. Celle-ci pourrait davantage refléter une sensibilité à la nouveauté (Nelson, Thomas, & De Haan, 2006).

Dynamique de la plasticité cérébrale associée à l'apprentissage moteur : un modèle

Sur base d'un ensemble de données d'imagerie (ainsi que des données animales et humaines obtenues en neurophysiologie), Doyon, Penhune et Ungerleider (2003) proposent un modèle rendant compte des changements cérébraux qui se produisent au cours de l'apprentissage d'habiletés motrices (voir Figure 2). L'intérêt principal de ce modèle est de montrer que l'implication des systèmes cortico-cérébelleux (CC) et cortico-striatal (CS) au cours de l'apprentissage dépend à la fois de la *phase d'apprentissage* (phase lente ou rapide, comme détaillé page 13), mais également du *type d'habileté* à acquérir (adaptation motrice *versus* apprentissage de séquences motrices). Au cours de la première session d'entraînement (lors de la phase rapide de l'apprentissage durant laquelle les sujets montrent une amélioration importante de leur performance), l'exécution des mouvements (dans les deux types d'habiletés) dépend de l'implication conjointe du striatum, du cervelet et des régions corticales motrices, en association avec les aires pariétales, préfrontales et limbiques. Doyon et Ungerleider (2002) soulignent que les interactions fonctionnelles entre les circuits CS et CC sont essentielles à la mise en place des routines motrices. Lorsque la performance a atteint un niveau asymptotique, les circuits impliqués dépendraient de la nature de la tâche. A cette étape (phase lente de l'apprentissage), l'exécution d'une habileté ayant nécessité l'adaptation motrice dépend du cervelet et des régions corticales associées ; l'implication du striatum diminue au fur et à mesure que les mouvements s'automatisent. Le pattern inverse est observé pour les tâches séquentielles, à savoir une diminution de l'apport fonctionnel du cervelet, alors que celui de la boucle CS se maintient. Ce modèle insiste donc sur les rôles spécifiques que jouent le cervelet et le striatum dans l'acquisition d'habiletés perceptivo-motrices, mais également sur les interactions avec d'autres régions cérébrales.

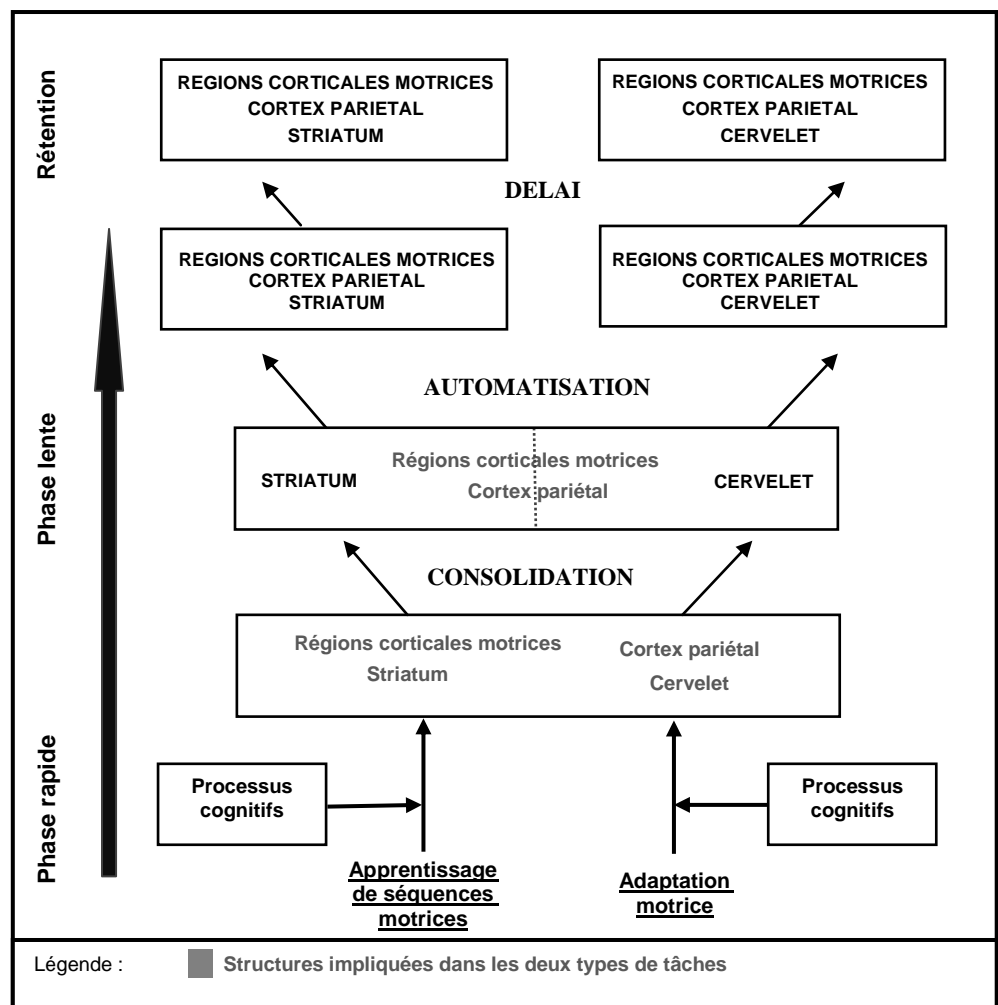


Figure 2. Modèle de plasticité cérébrale lié à l'apprentissage de séquences motrices versus adaptation motrice. Adapté de Doyon et al. (2003).

En résumé, l'ensemble des données décrites ici de manière très synthétique confirme l'intervention d'un ensemble de structures corticales et sous-corticales pendant l'apprentissage perceptivo-moteur. La plupart des études soulignent les spécificités des soubassements cérébraux de l'apprentissage procédural en fonction des particularités propres aux tâches administrées, mais également en fonction du stade d'acquisition de ces habiletés.

CHAPITRE 3

MEMOIRE PROCEDURALE ET DEVELOPPEMENT

Le développement de la mémoire procédurale est difficile à définir car ce système renvoie à un ensemble d'habiletés hétérogènes qui peuvent impliquer différents mécanismes cognitifs ayant chacun leur propre trajectoire développementale. Ainsi, poser la question du développement de la mémoire procédurale implique inévitablement de s'intéresser au développement d'autres systèmes cognitifs tels que les fonctions exécutives.

Nous débuterons ce chapitre par une brève description du développement des structures cérébrales au cours de l'enfance. Nous nous intéresserons ensuite aux phénomènes d'apprentissage déclaratif *versus* procédural (incluant les études sur l'apprentissage implicite et celles portant sur l'acquisition d'habiletés procédurales) tels qu'ils se développent au cours de l'enfance (c'est-à-dire durant la petite enfance, puis plus tard, au cours de la période scolaire). En outre, nous aborderons également le développement des fonctions exécutives. Enfin, nous clôturerons ce chapitre en présentant deux perspectives théoriques différentes concernant le développement de la mémoire chez l'enfant.

DEVELOPPEMENT DES STRUCTURES CEREBRALES

Généralités

A la naissance, la taille du cerveau représente approximativement 25% de la taille qu'il atteindra à l'âge adulte (Dekaban, 1977), puis elle augmente rapidement durant les deux premières années de vie. Alors que la taille du cerveau d'un enfant de 6 ans a atteint approximativement 90% de sa taille adulte, des modifications tissulaires importantes continuent à se produire jusqu'au début de l'âge adulte (soit entre 20 et 30 ans) (Giedd, 2004).

La maturation du cerveau dépend d'interactions complexes entre plusieurs processus dont certains s'achèvent avant la naissance alors que d'autres se poursuivent jusqu'à l'âge adulte (Lenroot & Giedd, 2006). De manière générale, on peut observer, au cours du développement, des mécanismes « positifs » (par exemple, le développement des axones) ainsi que des mécanismes « négatifs » (par exemple, la mort cellulaire programmée ou apoptose qui se produit *in utero* pour les régions sous-corticales et au cours de la première année de vie pour les régions corticales) (Huttenlocher & Dabholkar, 1997).

Plus spécifiquement, le processus de maturation des différentes structures cérébrales dépend principalement de changements au niveau du volume de la substance grise et, dans une moindre mesure, de changements au niveau de la substance blanche. Ainsi, le volume de la substance grise augmente, puis diminue au cours du développement, suivant une courbe en « U inversé » (Giedd et al., 1999). Le processus progressif permet d'augmenter les connexions entre les cellules alors que le processus régressif reflète le phénomène de « pruning », permettant un élagage et une sélection des connexions les plus appropriées en vue d'optimiser les circuits neuronaux.

Les variations de volume de matière grise diffèrent selon les régions cérébrales. Au niveau sous-cortical, le volume des noyaux gris centraux atteint un pic à l'âge de 7 ans pour les filles et de 10 ans pour les garçons, puis diminue, particulièrement chez les garçons (Giedd, 2004). Au niveau cortical, le volume de substance grise progresse jusqu'au début de l'adolescence, avec un maximum vers l'âge de 11-12 ans pour les

lobes frontaux et pariétaux, et vers 16 ans pour le lobe temporal. Ce n'est qu'après ce pic maturationnel que la substance grise commence à diminuer.

De manière générale, ce phénomène de réduction de matière grise permet d'augmenter le rendement du système cérébral en vue d'aboutir à une spécialisation et à une amélioration des différents processus cognitifs. Ces changements développementaux semblent ainsi pouvoir expliquer, au moins en partie, le développement différentiel des différents processus cognitifs (Eliez & Schaer, 2009). Ainsi, les régions qui supportent les fonctions motrices et sensorielles sont les premières à arriver à maturité. À l'inverse, les régions préfrontales et la partie latérale du cortex temporal sont les dernières régions à arriver à maturité, conduisant par conséquent à un développement plus tardif des fonctions supérieures qui en dépendent (Casey, Galvan, & Hare, 2005).

À la différence de la substance grise, la quantité de substance blanche (qui correspond à la myélinisation et à la croissance axonale) augmente de façon linéaire de la naissance jusqu'à environ 30 ans, et cette croissance semble relativement identique entre les régions cérébrales (Giedd et al., 1999; Lenroot & Giedd, 2006), ce qui explique que les tâches qui requièrent l'interaction de plusieurs aires cérébrales sont de mieux en mieux réussies avec l'avancement en âge.

Développement du striatum et du cervelet

Il est généralement admis que ces deux régions arrivent à maturité très tôt durant l'enfance, menant à un développement précoce des capacités d'apprentissage moteur qui en dépendent (Bauer, 2007). Toutefois, il n'existe actuellement que très peu de données sur le développement des structures sous-corticales ; la plupart des études se sont en effet focalisées sur le développement des régions corticales. Notons simplement que le striatum (faisant partie des noyaux gris centraux) est une des premières structures du télencéphale à se myéliniser et que le volume de matière grise, pour cette structure, diminue fortement avant l'âge de 5 ans (Giedd et al., 1996).

Le cervelet, quant à lui, se développe plus tard que les autres aires du cerveau durant la période de gestation (Griffiths et al., 2004). Il connaît ensuite un développement très rapide (Dobbing & Sands, 1973). Au cours de la première année de vie, une

augmentation considérable de la taille du cervelet est observée (estimée à 240%, alors que cette augmentation est d'environ 90% pour les hémisphères cérébraux) (Knickmeyer et al., 2008). Pour certains auteurs, le fait que cette structure se développe très rapidement sur une période de temps très courte, pourrait la rendre plus vulnérable à des pathologies développementales (voir par exemple, Bo & Lee, 2013).

DEVELOPPEMENT DE LA MEMOIRE DECLARATIVE

Un système de mémoire pré-déclarative ou pré-explicite (dépendant de l'hippocampe²⁷) apparaît disponible dès la petite enfance (Nelson, 1995). En effet, une série d'expériences démontrent que le bébé est sensible à la nouveauté : le bébé manifeste une préférence pour les stimuli nouveaux par rapport à des stimuli déjà traités (dans les tâches d'habituation et de comparaison de paires de stimuli visuels ; pour des revues, voir De Haan et al., 2006; Nelson & Webb, 2003).

Par exemple, des bébés âgés de 3 à 4 jours, confrontés à une paire de stimuli (tels que deux visages, dont un leur a déjà été présenté durant une phase de familiarisation) vont regarder plus longtemps le nouveau stimulus, même dans une condition où un délai de 2 minutes est inséré entre la phase de familiarisation et celle de test. Plus tard, cette capacité de reconnaissance est également visible pour des délais plus longs, allant jusqu'à 24 heures pour des enfants de 3 mois.

La transition entre la mémoire pré-explicite et la mémoire explicite se réalise généralement aux alentours de 6-12 mois (Nelson & Webb, 2003). Pendant cette période, l'effet de reconnaissance s'observe suite à des délais de plus en plus longs suivant l'exposition au stimulus. Le développement de certaines régions cérébrales (telles que le cortex temporal inférieur et le cortex rhinal) et des connexions de celles-ci avec l'hippocampe rend possible l'émergence de formes plus sophistiquées de mémoire explicite (Nelson & Webb, 2003), telles que la reconnaissance d'un objet dans une modalité sensorielle (par exemple, la vision) différente de celle dans laquelle l'objet avait été initialement présenté (par exemple, le toucher). Ensuite, avec la maturation des régions frontales (mais également des structures du lobe temporal), une amélioration sensible de la mémoire à long terme est observée au cours de la seconde

²⁷ Une conception alternative propose que les capacités de reconnaissance précoce soient sous-tendues par les régions impliquées dans le processus de familiarité chez l'adulte (voir pour une revue, De Haan, Mishkin, Baldeweg, & Vargha-Khadem, 2006).

année de vie, principalement concernant les capacités de récupération après un long délai.

La tâche d'imitation différée a été utilisée pour évaluer les capacités de mémoire déclarative chez le jeune enfant, à un stade pré-verbal. Celle-ci consiste à montrer aux nourrissons une action ou une séquence d'actions réalisées à l'aide de nouveaux objets (par exemple, *faire sonner une cloche ou abaisser le levier d'une petite porte pour ensuite l'ouvrir et découvrir un jouet*). Immédiatement ou après un certain délai, il est demandé à l'enfant de reproduire les actions montrées. Dans une expérience menée par Liston et Kagan (2002), des nourrissons de 13 mois sont incapables de se rappeler d'une séquence d'actions réalisées devant eux 4 mois auparavant (lorsqu'ils avaient 9 mois), alors que les enfants de 21 et 28 mois parviennent à récupérer la séquence apprise lorsqu'ils avaient 17 et 24 mois. Bauer (2005 ; voir également Bauer, 2006 pour une revue) apporte également des arguments en faveur de ces changements développementaux (auprès d'enfants âgés entre 13 et 20 mois), mais, pour cet auteur, les différences liées à l'âge seraient largement expliquées par des difficultés de stockage chez les bébés les plus jeunes, plutôt que par un problème de récupération.

A côté de ce système précoce de mémoire qui, par ailleurs, se révèle très dépendant du contexte d'apprentissage (De Haan et al., 2006), le système plus élaboré de mémoire épisodique ne semble émerger qu'aux alentours de 4-5 ans, et montre une amélioration tout au long de l'enfance et de l'adolescence, jusqu'à l'âge adulte. Chez des enfants scolarisés, V. A. Anderson et Lajoie (1996) montrent qu'à l'âge de 7-8 ans, les enfants réalisent des performances inférieures à celles des 9-11 ans à la plupart des tâches de mémoire épisodique. Plus spécifiquement, les résultats de leur étude suggèrent que les deux périodes aux alentours de 8-9 ans et de 12-13 ans sont critiques pour le développement de la mémoire à long terme. Cette amélioration des capacités mnésiques paraît, en partie, dépendre d'autres facteurs tels que l'augmentation avec l'âge de la vitesse de traitement de l'information ainsi que la capacité à mettre en place spontanément des stratégies efficaces d'encodage (Van der Linden, 2009). Ces changements, qui ont lieu durant l'enfance, sont vraisemblablement dus à la maturation du cortex préfrontal ainsi qu'au développement des connexions entre le cortex préfrontal et le lobe temporal médian (Nelson et al., 2006). Ainsi, de récentes données en neuro-imagerie (voir par exemple, Ofen et al., 2007) mettent en évidence une augmentation avec l'âge de la contribution du cortex préfrontal lors de l'encodage en mémoire épisodique²⁸.

²⁸ Le groupe testé était constitué de participants âgés de 8 à 24 ans.

En résumé, nonobstant le fait que des capacités de mémoire pré-verbale soient présentes à la naissance, la mémoire déclarative est immature à ce stade et va connaître des changements importants tout au long de l'enfance et de l'adolescence, notamment grâce à la maturation des régions temporales et frontales.

DEVELOPPEMENT DE LA MEMOIRE PROCEDURALE

Dans la littérature, on ne trouve aucune référence traitant du développement de la mémoire procédurale en tant que telle ; la différenciation développementale abordée dans les études s'exprime davantage en termes d'apprentissage ou de mémoire explicite *versus* implicite. Schacter et Moscovitch (1984) ont été les premiers à proposer que la dichotomie implicite *versus* explicite mise en évidence dans les études chez l'adulte pouvait également se révéler pertinente dans le cadre du développement de la mémoire, notamment parce que ces deux mécanismes sont sous-tendus par des aires cérébrales différentes, qui arrivent à maturité à des moments différents. En accord avec ces auteurs, la mémoire implicite (ou non déclarative) émergerait dès la naissance, alors que la mémoire explicite (ou déclarative) se développerait plus tard²⁹.

Dans cette section, après une brève synthèse des recherches réalisées au cours de la petite enfance, nous nous focaliserons sur les études qui ont exploré les capacités d'apprentissage implicite au moyen de la tâche de temps de réaction sériel dans une perspective développementale. Nous montrerons notamment que l'idée d'invariance développementale, telle qu'elle est généralement postulée pour l'apprentissage implicite (A. S. Reber, 1993), ne fait pas l'unanimité. Nous nous arrêterons ensuite sur les quelques rares études qui ont utilisé la tâche procédurale d'adaptation perceptivo-motrice chez l'enfant.

²⁹ A noter toutefois que cette conception ne fait pas l'unanimité. Par exemple, Rovee-Collier suggère que les processus de mémoire explicite et implicite sont présents et fonctionnels dès les premiers mois de vie (Rovee-Collier, 1999; Rovee-Collier & Giles, 2010).

Petite enfance

La littérature sur le développement cérébral montre que les structures que sont le striatum et le cervelet, fonctionnelles très tôt dans le développement, permettent à de jeunes enfants de démontrer un apprentissage dans des tâches *d'anticipation visuelle et de conditionnement* (Nelson & Webb, 2003). Dans les paragraphes qui suivent, nous présentons les résultats obtenus avec ces tâches, souvent considérées comme des paradigmes d'apprentissage procédural proches de ceux utilisés dans les études chez l'adulte.

La tâche d'anticipation visuelle (« Visual Expectation Task », VExp) permet d'évaluer la capacité des jeunes enfants à détecter des régularités dans leur environnement. Cette tâche est considérée par Charles Nelson comme un précurseur développemental de la tâche de temps de réaction sériel (Nelson, 1995; voir aussi Nelson & Webb, 2003). Dans cette épreuve, des séquences prédictibles et non prédictibles de dessins sont présentées dans deux localisations différentes. La vitesse et l'exactitude des mouvements oculaires sont enregistrés et reflètent la capacité de l'enfant à prédire ou anticiper la localisation des stimuli. Les études montrent qu'à partir de 2-3 mois, les enfants sont capables d'anticiper l'apparition de cibles qui suivent une séquence simple (Canfield & Haith, 1991; Clohessy, Posner, & Rothbart, 2001; Haith & McCarty, 1990; Wentworth & Haith, 1992). Par contre, Clohessy et al. mettent en évidence qu'une séquence plus complexe (par exemple, la séquence « 1213 » qui contient une association ambiguë³⁰) ne peut pas être apprise avant l'âge de 18 mois. Les auteurs suggèrent que l'apprentissage de séquences ambiguës requiert l'implication des structures frontales et que cela peut expliquer les changements dus à l'âge. Par ailleurs, Bremner, Mareschal, Destrebecqz et Cleeremans (2007) ont également observé que des enfants de 2 ans étaient capables d'apprendre implicitement une séquence déterministe de six éléments.

³⁰ Le sujet ne peut prédire de manière certaine si 1 sera suivi par 2 ou par 3 sans prendre en compte le stimulus précédent.

A l'aide de la tâche du mobile³¹, une forme de conditionnement opérant, Carolyn Rovee-Collier et son équipe (pour une revue, voir Rovee-Collier, 1997; voir aussi Rovee-Collier & Cuevas, 2009) démontrent que des bébés de 2 mois peuvent apprendre des relations entre un comportement moteur particulier (par exemple, un coup de pied) et un événement (l'activation du mobile). Si les capacités d'apprentissage sont identiques entre 2 et 18 mois, des différences liées à l'âge sont révélées concernant les capacités de rétention. Sur le plan cérébral, une étude en neuro-imagerie met en évidence le rôle croissant du cervelet et des noyaux gris centraux durant l'apprentissage via le conditionnement. Les données montrent également que l'implication du réseau fronto-pariétal a tendance à décroître au fur et à mesure de la pratique de la tâche, tout comme on peut l'observer dans les tâches d'acquisition d'habiletés procédurales (Deiber et al., 1997; voir aussi Nelson & Webb, 2003).



Périodes préscolaire et scolaire

Apprentissage de séquences perceptivo-motrices

A ce jour, seulement six études utilisant la tâche de temps de réaction sériel dans une perspective développementale ont été publiées. Dans une première expérience, conduite par Thierry Meulemans et collaborateurs en 1998, les performances d'enfants de 6 et 10 ans, ainsi que celles d'un groupe de jeunes adultes, ont été comparées sur une tâche de TRS. La phase d'apprentissage consistait à présenter une séquence ambiguë de 10 éléments (2-4-1-3-4-2-1-4-3-1), en alternance avec des stimuli apparaissant de manière pseudo-aléatoire³². Leurs résultats montrent des performances équivalentes pour l'apprentissage spécifique de la séquence entre les

³¹ Les bébés apprennent, via une procédure de conditionnement opérant, à activer un mobile placé au-dessus de leur berceau en agitant le pied (celui-ci étant relié au mobile à l'aide d'un ruban).

³² Pour la construction des essais pseudo-aléatoires, les auteurs ont veillé à ce que deux stimuli identiques ne se suivent pas. Ils ont également contrôlé la répétition plus fréquente de certains éléments (par exemple, la position 4 apparaissait plus fréquemment que la position 2 dans la séquence d'apprentissage et dans les essais aléatoires).

trois groupes. En ce qui concerne les résultats à un test explicite de reconnaissance³³, la performance des sujets ne diffère pas du niveau du hasard ; cela suggère que les participants n'ont pas développé de connaissances explicites concernant la séquence. Les auteurs concluent à l'absence de différence liée à l'âge dans la tâche de temps de réaction sériel. Ces résultats constituent ainsi la première démonstration que les mécanismes d'apprentissage implicite de régularités séquentielles sont efficaces tôt dans le développement.

Deux autres études, utilisant une version plus traditionnelle de la tâche de TRS, confirment ce premier résultat. Karatekin, Marcus et White (2007) administrent une séquence ambiguë, proche de celle utilisée par Meulemans et ses collègues, à trois groupes d'enfants âgés respectivement de 8-10 ans, 11-13 ans, 14-17 ans, ainsi qu'à un groupe de jeunes adultes. La procédure consistait en la présentation de trois blocs d'apprentissage (les blocs 2, 3 et 5 durant lesquels la séquence d'apprentissage était répétée en boucle) et de deux blocs pseudo-aléatoires (blocs 1 et 4). Tout comme dans l'étude de Meulemans et al., leurs résultats ne mettent en évidence aucun effet de l'âge pour l'apprentissage spécifique de la séquence. Plus récemment, Lum, Kidd, Davis et Conti-Ramsden (2009) mènent une étude longitudinale sur une période de 12 mois en administrant une tâche de TRS à 40 enfants âgés de 5 ans et demi lors de la première évaluation. Les résultats obtenus montrent des performances similaires après 1 an, et rejoignent ainsi les conclusions des études transversales.

Toutefois, deux études menées par Kathleen Thomas et ses collaborateurs (2001, 2004) apportent des données contradictoires, démontrant que des améliorations liées à l'âge pouvaient être observées dans des tâches de temps de réaction sériel. Ainsi, Thomas et Nelson, en 2001, confrontent des enfants de 4, 7 et 10 ans à l'apprentissage d'une séquence de 10 éléments. La tâche comprenait cinq blocs (la position des stimuli était aléatoire dans les blocs 1 et 4 et suivait une séquence prédéterminée dans les trois autres blocs, 2, 3 et 5). Les sujets devaient répondre à

³³ Dans une tâche de reconnaissance, les sujets sont confrontés à des fragments de séquences, dont certains sont issus de la séquence d'apprentissage et d'autres de séquences qui n'ont pas été présentées durant la phase d'apprentissage. Une connaissance explicite de la séquence est révélée si le nombre de reconnaissances est plus important pour les fragments issus de la séquence d'apprentissage.

l'aide d'un boîtier réponse³⁴ (constitué de quatre boutons alignés horizontalement, correspondant à la localisation des quatre positions sur l'écran). Pour les enfants de 4 ans, le boîtier réponse et la présentation des stimuli ont été adaptés, vu leur jeune âge (voir page 54). La connaissance explicite concernant la séquence était ensuite testée à l'aide d'une interview structurée³⁵, puis d'une épreuve de génération indicée. Les analyses, d'abord réalisées sur les enfants de 7 et de 10 ans, ne montrent aucun effet lié à l'âge sur la mesure généralement utilisée pour évaluer la connaissance implicite de la séquence (c'est-à-dire en comparant les temps de réponse pour le dernier bloc d'apprentissage avec ceux pour le bloc aléatoire). Par contre, le calcul d'un indice d'apprentissage³⁶ (qui permet de prendre en compte les différences dues à l'âge quant à la vitesse globale de réaction) met en évidence une différence entre les enfants de 7 ans et de 10 ans. Bien que cette différence ne soit pas statistiquement significative, les auteurs soulignent une tendance allant dans le sens de meilleures capacités d'apprentissage pour les enfants plus âgés. De plus, une analyse complémentaire, basée sur le nombre d'appuis anticipés sur la touche réponse (c'est-à-dire le nombre de fois où les temps de réaction durant la séquence sont plus rapides que le temps de réponse le plus rapide des essais aléatoires), met en évidence des changements développementaux (les enfants de 10 ans produisent un nombre plus important de réponses anticipées) ; les auteurs interprètent ce dernier résultat comme le reflet du développement des connaissances explicites avec l'âge. En effet, ils observent que les enfants démontrant une connaissance complète de la séquence à la fin de la tâche, à savoir les enfants les plus âgés, montrent un apprentissage spécifique de la séquence plus important que les enfants sans connaissance explicite. Pour les enfants d'âge préscolaire, les résultats montrent qu'ils ont appris la séquence au cours de la tâche de TRS ; par contre, leur connaissance explicite concernant celle-ci était très faible, de même que la présence de réponses anticipées. Les auteurs montrent également que

³⁴ Plutôt qu'avec le clavier de l'ordinateur, comme c'est généralement le cas.

³⁵ Ce test consiste à demander au sujet s'il a remarqué la présence d'une règle ou d'une séquence particulière dans la tâche qu'il vient de réaliser. Les enfants sont ainsi invités à exprimer leur connaissance soit verbalement, soit en montrant sur l'écran ou sur le boîtier réponse la position des stimuli dans la séquence.

³⁶ L'indice d'apprentissage est calculé comme suit : $(\text{bloc aléatoire} - \text{bloc séquence}) \div (\text{bloc aléatoire} + \text{bloc séquence})$.

les enfants de 4 ans ont un indice plus faible d'apprentissage que les enfants de 7 et de 10 ans.

Plus récemment, Thomas et al. (2004) conduisent une étude en neuro-imagerie cérébrale visant à comparer un groupe de 10 enfants (âgés entre 7 et 11 ans) avec un groupe de 10 adultes sur une tâche de TRS, adaptée de celle Meulemans et al. (1998). Les séquences utilisées dans ces deux études étaient globalement de même niveau de complexité. Les données d'imagerie mettent en évidence des différences développementales parmi les régions cérébrales activées durant la tâche de TRS : les enfants mobilisent davantage les structures sous-corticales alors que les adultes activent plus les régions corticales. En parallèle, les données comportementales montrent des capacités d'apprentissage de la séquence supérieures dans le groupe des adultes par rapport au groupe d'enfants, malgré l'absence de connaissances explicites de la séquence. Pour les auteurs, ce pattern de résultats suggère que l'apprentissage implicite de séquences peut montrer une amélioration avec l'âge, et ce contrairement à l'hypothèse de l'invariance développementale généralement postulée.

Enfin, De Guise et Lassonde (2001) comparent la performance d'enfants à la tâche de TRS administrée sous deux conditions (uni- et bi-manuelle). Leurs résultats montrent un apprentissage de la séquence équivalent chez des enfants âgés de 6 à 16 ans, mais uniquement lorsque la tâche est effectuée à l'aide d'une seule main. Seuls les enfants de plus de 12 ans montrent un apprentissage dans la condition bi-manuelle. Selon les auteurs, l'immaturation du corps calleux avant 12 ans empêcherait un apprentissage nécessitant une intégration inter-hémisphérique. En effet, la condition bi-manuelle implique que l'information soit intégrée par les deux hémisphères. Or, ce rôle est joué par le corps calleux, dont le développement se poursuit jusqu'à l'adolescence (McLaughlin et al., 2007). Toutefois, ces résultats, qui mettent en évidence une absence d'effet d'apprentissage chez les plus jeunes enfants en condition bi-manuelle, n'ont pas été confirmés par d'autres études utilisant le même type de dispositif (voir par exemple Karatekin et al., 2007 ; Meulemans et al., 1998). Les résultats doivent donc être interprétés avec précaution, d'autant plus que le nombre de sujets testés était faible (10 enfants par groupe).

De ces études sur l'apprentissage implicite de régularités séquentielles, il ressort que ces capacités sont présentes tôt dans le développement. Par contre, à ce jour, le nombre limité d'études développementales n'a pas permis d'apporter de réponse claire à la question de l'invariance développementale. Si la première étude, conduite par Meulemans et al. (1998), suggère l'absence d'effet dû à l'âge (voir aussi Karatekin et al., 2007), d'autres études conduisent à des résultats contradictoires, montrant qu'une influence de l'âge est observée dans certaines conditions (par exemple, Thomas et al., 2004).

Toutefois, les apparentes contradictions observées entre ces études pourraient dépendre de facteurs méthodologiques relatifs par exemple aux contraintes statistiques de la séquence, à la durée de l'intervalle entre les essais, à la structure statistique des séquences, à la durée de la phase d'entraînement ou encore au type de modalité de réponse. Nous présentons ci-dessous ces principales différences méthodologiques, dont certaines favorisent clairement l'intervention de mécanismes explicites (ce qui pourrait expliquer les différences dues à l'âge dans certaines études).

Contraintes statistiques des séquences

Une séquence à fortes contraintes statistiques est une séquence dans laquelle des ensembles d'éléments sont répétés plusieurs fois Stadler (1992). Par exemple, certaines suites de deux éléments (bigrammes) ou de trois éléments (trigrammes) peuvent se répéter au sein d'une même séquence. A l'inverse, une séquence dans laquelle aucune suite d'éléments ne se répète est une séquence à faibles contraintes statistiques. Selon Stadler (1992), le degré de contraintes statistiques a une influence sur l'apprentissage, les premières étant plus facilement apprises que les secondes.

Dans la séquence utilisée par Thomas et Nelson (2001), le trigramme « 241 » est deux fois plus probable que les autres trigrammes. Cette particularité pourrait expliquer le développement d'une connaissance explicite de la séquence, de même que la présence d'un effet de l'âge.

Intervalle réponse-stimulus (IRS)

Thomas et al. (2004) mettent en évidence un effet lié à l'âge en utilisant une méthodologie assez proche de celle employée par Meulemans et al. (1998 ; c'est-à-dire une alternance entre des essais aléatoires et la séquence répétée). Les séquences étaient par ailleurs assez similaires dans les deux études. Toutefois, l'intervalle réponse-stimulus (IRS) était plus long dans l'étude de Thomas et al. (750 msec au lieu des 250 msec généralement imposées). Or, certains auteurs (e.g., Destrebecqz et al., 2005) montrent qu'un IRS long favorise l'élaboration d'une connaissance explicite de la séquence d'apprentissage et peut ainsi influencer la performance. On ne peut donc exclure que les différences mises en évidence entre ces deux études puissent être

expliquées par l'intervention de mécanismes explicites dans l'étude de Thomas et al. ; ces mécanismes auraient alors facilité l'apprentissage dans le groupe des adultes par rapport au groupe d'enfants.

Structure statistique de la séquence

Toutes les séquences utilisées dans les études développementales décrites ci-avant sont des séquences ambiguës de 10 éléments dans lesquelles la connaissance des deux éléments précédents est nécessaire pour prédire la localisation suivante. Par exemple dans la séquence 3-4-1-3-2-1-4-3-1-2 (utilisée par Thomas et al., 2004), le sujet peut apprendre que si 4 est précédé de 3, alors il sera suivi de 1 ; il s'agit là de relations conditionnelles de second ordre (cf. page 28). Toutefois, la particularité des séquences composées de 10 éléments (pour 4 localisations possibles) est que certains stimuli apparaissent inévitablement plus fréquemment que d'autres : par exemple la position 3 apparaît trois fois alors que la position 2 n'apparaît que deux fois. Dès lors, l'apprentissage pourrait en partie être basé sur des informations simples de fréquence (le sujet pourrait apprendre qu'une localisation est plus fréquente qu'une autre). Idéalement, cette fréquence d'apparition plus importante de certaines localisations devrait se retrouver dans les essais aléatoires (Curran, 1997; voir aussi Meulemans, 1997). Parmi les études citées ci-dessus, seulement trois d'entre elles contrôlent la fréquence d'occurrence des stimuli dans les essais aléatoires (Karatekin et al., 2007; Meulemans et al., 1998; Thomas & Nelson, 2001). Par ailleurs, dans les séquences de 10 éléments, le sujet peut également apprendre des associations simples entre les paires de stimuli (par exemple, 4 peut être suivi de 1 ou de 3, mais n'est jamais suivi de 2). L'apprentissage de ce type de séquence pourrait alors dépendre de l'apprentissage de relations conditionnelles de 1^{er} ordre (FOC pour first-order conditional). Seule l'étude conduite par Karatekin et al. contrôle la fréquence des relations FOC dans le bloc aléatoire. Ainsi, comme le soulignent ces auteurs, l'effet d'apprentissage mis en évidence par les études précédentes pourrait ne pas refléter uniquement l'apprentissage d'informations complexes.

Les études réalisées chez l'adulte utilisent généralement des séquences SOC (pour second-order conditional) comportant 12 éléments. L'avantage de ce type de séquence est que toutes les associations simples entre les paires de stimuli sont présentées avec une fréquence équivalente. Ainsi, dans la séquence 1-2-1-3-4-2-3-1-4-3-2-4, seule la connaissance des deux éléments précédents permet de prédire une localisation (par exemple, on peut prédire que la localisation 3 est suivie de 1 seulement si 3 est précédé de 2). Il est donc plus aisé de construire une nouvelle séquence (dite de transfert), semblable à la séquence d'apprentissage, et qui ne s'en distingue que par ses relations conditionnelles de second ordre. De cette manière, l'avantage pour la séquence répétée (par rapport à la séquence de transfert) ne peut que refléter l'apprentissage de relations complexes entre éléments.

Chez l'enfant, quelques études ont utilisé des séquences SOC de 12 éléments (Deroost et al., 2010; Gabriel et al., 2013). Les résultats de ces deux études montrent qu'une séquence SOC de 12 éléments peut être apprise par des enfants âgés entre 7 et 15 ans.

A noter que la **durée d'exposition à la séquence d'apprentissage** peut également avoir une influence sur l'apprentissage. Ainsi, une exposition plus fréquente à la séquence favorise le développement d'une connaissance explicite (Lum, Ullman, & Conti-Ramsden, 2013).

Modalités de réponse

La complexité de la procédure pour des enfants en bas âge pourrait également expliquer certaines différences de performance. Pour effectuer correctement une tâche de TRS, le sujet doit montrer une certaine aisance dans l'utilisation du clavier ; il doit être également capable d'associer facilement les touches à leur position correspondante sur l'écran. Pour de jeunes enfants, ce type de dispositif peut représenter une réelle difficulté.

Par exemple, De Guise et Lassonde (2001) démontrent qu'une condition de réponse bi-manuelle peut entraver l'apprentissage de la séquence pour de jeunes enfants. Thomas et Nelson (2001), qui sont les seuls à inclure un groupe d'enfants d'âge préscolaire, choisissent d'adapter le dispositif de réponse afin d'en faciliter sa manipulation. En effet, les auteurs craignent que les enfants aient des difficultés avec le matériel en raison de leurs plus faibles capacités motrices et cognitives. Ils adaptent donc la présentation des stimuli (plutôt qu'une présentation linéaire, une présentation en carré était utilisée pour mieux séparer les cibles spatialement) et utilisent un boîtier-réponse plus grand que de coutume (5 x 5 cm). L'influence de ces modifications sur l'apprentissage de la séquence n'est toutefois pas explorée. Gabriel, Stefaniak, Maillart, Schmitz et Meulemans (2012), montrent, au moyen de la tâche de TRS, que la vitesse de réponse d'enfants dysphasiques est ralentie par rapport à celle des enfants de contrôle lors de l'utilisation du clavier d'ordinateur comme mode de réponse alors qu'aucune différence entre les deux groupes d'enfants n'est mise en évidence lors de l'utilisation d'un écran tactile. L'avantage de ce mode de réponse est qu'il ne requiert pas d'apprendre la correspondance entre la localisation de la cible sur l'écran et une touche de réponse sur le clavier. L'enfant répond donc directement sur l'écran tactile. Dès lors, ce mode de réponse réduit (voire élimine) les contraintes cognitives et perceptivo-motrices associées à la tâche classique de TRS, et représente ainsi une alternative intéressante pour l'étude de ces mécanismes chez des enfants jeunes et/ou présentant des troubles moteurs et/ou cognitifs.

Adaptation perceptivo-motrice

Seules quelques études ont utilisé la tâche d'adaptation perceptivo-motrice chez l'enfant, mais, à aucun moment, ces articles ne font référence à la notion d'apprentissage procédural. L'intérêt des chercheurs ne porte pas sur l'apprentissage d'une habileté en tant que tel, mais plutôt sur la manière dont les représentations internes des mouvements se développent avec l'âge. Ferrel-Chapus, Hay, Olivier, Bard et Fleury (2002) explorent les capacités adaptatives d'enfants âgés de 5 à 11 ans et d'un groupe d'adultes dans une tâche adaptée du paradigme de dessin en miroir. Les

participants devaient tracer le contour d'une forme géométrique sur une tablette à l'aide d'un stylet (voir Figure 3), dans une condition où la scène visuelle faisait l'objet d'un retournement de 180°. Ils ne pouvaient voir le résultat de leur production que sur l'écran d'ordinateur. Cette étude montre des différences de performance liées à l'âge : les enfants de 5 et de 7 ans sont davantage gênés par la distorsion visuelle que les enfants de 9 et 11 ans. Toutefois, malgré ces différences initiales dans la performance, les enfants finissent par atteindre un niveau d'apprentissage de l'habileté comparable à celui des adultes. Les causes précises pouvant rendre compte de ces différences de performance dans les premières étapes du processus d'apprentissage entre des enfants jeunes et plus âgés n'ont cependant pas été identifiées. Deux autres études, incluant des enfants de 4, 6 et 8 ans, révèlent également que les jeunes enfants (de 4 et 6 ans) sont plus affectés par la perturbation visuelle que des enfants de 8 ans (Bo, Contreras-Vidal, Kagerer, & Clark, 2006; Contreras-Vidal, Bo, Boudreau, & Clark, 2005). Contreras-Vidal et al. suggèrent que les capacités d'adaptation peuvent dépendre de stratégies cognitives, sans toutefois en préciser la nature. Une étude plus récente montre que, lorsqu'ils sont confrontés à des distorsions visuelles plus importantes ($> 45^\circ$), les enfants de 5 ans ont des difficultés à réaliser des rotations mentales et que, contrairement aux adultes, ils ne semblent pas utiliser de stratégies explicites pour atteindre la cible (Tahej, Ferrel-Chapus, Olivier, Ginhac, & Rolland, 2012).

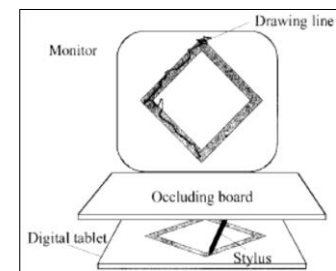


Figure 3. Dispositif expérimental (tiré de Ferrel-Chapus et al., 2002).

En résumé, alors que les systèmes d'apprentissage déclaratif ou explicite démontrent clairement des améliorations sur le plan développemental, aucun consensus n'existe par rapport au développement des mécanismes d'apprentissage implicite ou procédural. A l'heure actuelle, s'il est clair que l'apprentissage implicite est présent dès les premiers mois de vie, on ne peut encore affirmer que ce système est mature à cet âge. En effet, des différences liées à l'âge ont été révélées par certaines études, mais, comme nous l'avons montré, ces effets pourraient être expliqués par certains facteurs qui favorisent l'exploitation intentionnelle de connaissances explicites. Evidemment, si de tels processus devaient intervenir durant l'apprentissage implicite, un effet de l'âge

pourrait être attendu dans le sens de meilleures performances pour les enfants les plus âgés.

Quant aux mécanismes d'apprentissage procédural, tel qu'évalués à l'aide de tâches d'adaptation motrice, les données présentées soulèvent clairement la question de la nature des processus cognitifs qui sous-tendent ce type d'apprentissage (principalement en début de tâche) chez les plus jeunes enfants, pour qui les processus explicites sont en plein développement.

DEVELOPPEMENT DES FONCTIONS EXECUTIVES

Dans cette section, nous décrivons les trajectoires développementales propres aux fonctions exécutives qui paraissent jouer un rôle clé dans l'apprentissage procédural (du moins, chez l'adulte). Si l'on considère que l'acquisition d'une habileté procédurale dépend initialement des fonctions exécutives, des différences liées à l'âge devraient être observées sur le plan de l'apprentissage procédural car les fonctions exécutives connaissent un développement important durant l'enfance. Comprendre le développement de ces fonctions pourrait donc s'avérer essentiel pour l'étude de l'apprentissage procédural chez l'enfant.

D'une manière générale, les processus exécutifs se développent tout au long de l'enfance ; un niveau comparable à celui de l'adulte peut être atteint vers l'âge de 8-10 ans, ou plus tard au cours de l'adolescence, en fonction de la nature des processus concernés et de la complexité des tâches administrées (voir pour des revues récentes, Catale, 2010; Zesiger, 2009). Nous reprenons ci-dessous, de façon très synthétique, le développement des trois principales fonctions exécutives telles que décrites par Miyake et collaborateurs (2000) : l'inhibition, la flexibilité et la mémoire de travail.

Inhibition

L'habileté à supprimer ou différer l'apparition d'une réponse dominante ou automatique est présente dès les premiers mois de vie, mais cette capacité de contrôle s'améliore de façon significative tout au long de l'enfance (par exemple, Prevor & Diamond, 2005). Ainsi, entre 8 et 12 mois, le jeune enfant serait déjà capable d'inhiber une réponse prédominante (Diamond, 1991). Chez des enfants d'âge préscolaire, Diamond et Taylor (1996) proposent une épreuve de « tapping » dans laquelle l'enfant doit, à l'aide

d'un crayon, frapper un coup sur la table lorsque l'examineur frappe deux coups, et vice versa. Les résultats montrent que les enfants âgés entre 3 ans et demi et 7 ans présentent un développement très progressif de cette fonction, avec un changement qui était toutefois plus marqué vers l'âge de 6 ans. Chez les enfants d'âge scolaire, des mesures plus sophistiquées, telle que la tâche de type Stroop ou de type go-no go, ont permis de mettre en évidence la persistance d'une amélioration développementale jusqu'à la période de pré-adolescence. Par exemple, Levin et ses collaborateurs (1991) ont montré que la performance des enfants à des tâches de type go-no go arrivait à maturité vers l'âge de 12 ans. A l'aide de la tâche de go-no go et du test de type Stroop, Brocki et Bohlin (2004) identifient trois étapes clés dans le développement de la fonction d'inhibition : entre 6 et 8 ans, entre 9 et 12, puis au début de l'adolescence (avec des changements plus subtils). Finalement, à l'adolescence, les performances pourraient continuer à s'améliorer, selon certains auteurs, jusqu'à l'âge de 15 ans (Huizinga, Dolan, & van der Molen, 2006).

Flexibilité

Notre capacité à alterner entre plusieurs types de traitements cognitifs connaît également d'importants changements, principalement durant la période scolaire (Huizinga et al., 2006; Huizinga & van der Molen, 2007; Somsen, 2007). Par exemple, Huizinga et collaborateurs montrent, à l'aide d'une tâche de type « switching³⁷ », que la performance des enfants s'améliore, de façon significative, entre 7 et 11 ans, atteignant le niveau adulte vers l'âge de 15 ans.

La tâche du Wisconsin Card Sorting Test a fréquemment été utilisée pour évaluer les capacités de flexibilité sur le plan développemental. Un niveau de performance équivalent à celui de l'adulte serait atteint vers l'âge de 10-12 ans (Somsen, 2007).

Des adaptations des épreuves de classement de cartes ont été réalisées pour des enfants d'âge pré-scolaire. Ces études révèlent que de jeunes enfants, âgés de 4 ans, sont capables d'effectuer des tâches qui requièrent une alternance entre deux dimensions (voir par exemple, Schouten, Oostrom, Peters, Verloop, & Jennekens-Schinkel, 2000). Une amélioration importante des capacités de flexibilité peut être

³⁷ Ce type d'épreuve implique la réalisation en alternance de deux tâches relativement faciles.

observée entre 4 et 5 ans (Smidts, Jacobs, & Anderson, 2004) ; celle-ci se poursuit au-delà de l'âge de 7 ans sur des tâches similaires (Jacobs, Anderson, & Harvey, 2001)

Mémoire de travail

Des capacités précoces de mémoire à court terme peuvent être observées dès l'âge de 7 mois, mais la capacité à manipuler des informations en mémoire de travail se développe tout au long de l'enfance et de l'adolescence. Généralement, des améliorations peuvent être observées jusqu'à l'âge de 16 ans (Luciana, Conklin, Hooper, & Yarger, 2005). Les trajectoires développementales dépendent, à nouveau, de la nature et de la complexité des tâches administrées.

Schleepen et Jonkman (2010) ont étudié le développement de la fonction de mise à jour à l'aide de la tâche « n-back³⁸ » chez des enfants de différents âges (6-7 ans, 8-9 ans et 10-12 ans) ainsi que dans un groupe d'adultes. Les résultats montrent que des performances équivalentes à celles des adultes peuvent être atteintes vers l'âge de 10-12 ans à la tâche de niveau n-1. Les performances obtenues pour la réalisation du niveau n-2, qui sollicite des ressources plus importantes en termes de manipulation en mémoire, s'améliorent jusqu'à l'adolescence.

En résumé, les trajectoires développementales sont spécifiques à chaque fonction exécutive. De manière générale, ces travaux montrent que des capacités exécutives sont présentes assez tôt chez le jeune enfant, et qu'elles progressent jusqu'à l'adolescence, voire même au-delà.

MODELES D'ACQUISITION D'HABILETES CHEZ L'ENFANT

La plupart des études que nous avons présentées dans les sections précédentes, consacrées au développement de la mémoire, soulèvent la question des mécanismes cognitifs qui interviennent dans l'apprentissage d'une nouvelle habileté procédurale. Généralement, ces recherches comparent des enfants d'âges différents, ou des enfants avec un groupe de jeunes adultes dans le but de mettre en évidence d'éventuelles dissociations au cours de l'apprentissage. Toutefois, la question des

³⁸ Dans cette épreuve, l'enfant voit défiler des lettres/chiffres présentés un à un sur un écran d'ordinateur. La tâche consiste à réagir lorsque la lettre ou le chiffre présenté est identique au dernier lettre/chiffre présenté (n-1) ou à l'avant-dernier lettre/chiffre présenté (n-2).

mécanismes impliqués dans l'apprentissage à différents moments du développement se pose évidemment différemment selon la perspective théorique adoptée.

Dans le cadre de ce travail de thèse, il nous paraissait important d'aborder deux modèles théoriques particulièrement influents dans le domaine de la psychologie du développement. Le premier démontre comment les mécanismes implicites *versus* explicites se mettent en place au cours du développement. Le second, quant à lui, adopte une position très différente quant aux mécanismes sous-tendant la capacité précoce de l'enfant à interagir efficacement avec son environnement.

Annette Karmiloff-Smith (1992) propose un modèle général du développement cognitif de l'enfant basé sur une conception « bottom-up ». Elle postule que, durant l'enfance, les représentations implicites de bas niveaux se transforment en représentations explicites, selon un processus de *redescription des représentations*. La première étape du développement est le résultat d'une période d'interactions répétées avec l'environnement, qui conduit à la formation d'une connaissance implicite sur les règles régissant la situation cible. A ce stade, le comportement produit est relativement efficace, mais il est totalement dépendant du contexte et donc, peu flexible. Ensuite, via un processus endogène de redescription, les représentations implicites sont transformées dans un format explicite, plus flexible, et permettant dès lors une certaine généralisation (par exemple, les connaissances pourront être utilisées dans d'autres contextes). Toutefois, selon Karmiloff-Smith, le terme « explicite » n'est pas forcément synonyme de « conscient » ou « verbalisable ». En effet, plusieurs redescriptions sont nécessaires pour que les représentations explicites deviennent accessibles à la conscience et exprimables verbalement.

Cette conception « bottom-up » attribue donc un rôle central à l'apprentissage implicite dans la formation de nouveaux comportements ou connaissances. Karmiloff-Smith défend l'idée de la primauté des processus implicites par rapport à l'explicite, rejoignant en cela la position d'Arthur Reber (1993).

Les travaux réalisés par **Pierre Perruchet et Annie Vinter** (Perruchet & Vinter, 1998; Vinter & Perruchet, 1994) proposent une vision quelque peu différente de celle défendue par Karmiloff-Smith. Selon les auteurs, l'aptitude de l'enfant à interagir efficacement avec son environnement dépend de l'action de processus associatifs

élémentaires qui permettent à l'enfant de découper le flux d'informations en provenance de l'environnement en petites unités, composées d'éléments primitifs. L'idée est que l'attention de l'enfant est capturée par une série de stimuli qui partagent des propriétés spécifiques (telles que par exemple, la nouveauté ou le mouvement). Automatiquement, le processus qui consiste à segmenter les items présentés se met en route dans le but de créer de nouvelles unités ou de renforcer les relations entre certaines unités existantes afin de permettre l'élaboration d'unités plus complexes. Ces traitements associatifs modifient ainsi progressivement, via le jeu des interactions avec l'environnement, les représentations qu'a l'enfant de celui-ci. L'apprentissage implicite, selon ce point de vue, renvoie ainsi à un mode d'adaptation dans lequel le comportement de l'enfant est sensible aux régularités présentes dans une situation, sans que cette adaptation ne soit le fruit d'une quelconque intention d'apprendre. Alors que de nombreux chercheurs pensent que l'apprentissage implicite est inconscient et automatique (et dès lors peu sensible aux variations attentionnelles), Perruchet et Vinter défendent l'idée qu'un traitement attentionnel de l'information est nécessaire. Ici, c'est le processus de segmentation qui est considéré comme non intentionnel ou inconscient et non la connaissance acquise.

CONCLUSION

La distinction entre apprentissage implicite *versus* explicite, initialement proposée chez l'adulte, semble prédominante pour envisager le développement de la mémoire chez l'enfant. Dans la littérature développementale, aucune référence n'est faite au concept « d'apprentissage procédural » (en réalité, certains auteurs utilisent ce terme, mais comme synonyme d'apprentissage implicite). Ainsi, les études chez l'enfant se sont principalement centrées sur les capacités d'apprentissage implicite. Le peu d'intérêt montré pour les situations classiques d'apprentissage procédural (telles que, par exemple, le dessin en miroir) est sans doute dû en partie à la difficulté que présente l'élaboration d'outils d'évaluation de ces capacités spécifiquement adaptés aux enfants en bas âge. Dès lors, de nombreuses questions restent à ce jour en suspens, notamment concernant les mécanismes cognitifs impliqués durant les premières phases de l'apprentissage procédural. *A priori*, on pourrait penser que l'apprentissage procédural chez le jeune enfant est forcément implicite, puisque les structures cérébrales sous-tendant les processus explicites (notamment exécutifs) sont en plein

développement. En définitive, si le terme d'apprentissage procédural apparaît peu dans les études développementales, l'étude des capacités d'apprentissage d'habiletés perceptivo-motrices n'en demeure pas moins importante, sans a priori sur les mécanismes (explicites ou implicites) qui sous-tendent ces capacités chez l'enfant.

CHAPITRE 4

NEUROPSYCHOLOGIE DE LA MEMOIRE PROCEDURALE CHEZ L'ENFANT

Dans ce chapitre, nous présenterons une synthèse des recherches relatives à l'étude de la mémoire procédurale chez des enfants atteints de pathologies neurologiques acquises ou développementales. Bien que la mémoire procédurale soit généralement décrite comme un système robuste face aux pathologies cérébrales, nous aborderons également la question de sa vulnérabilité face à certains troubles du développement. Les deux dernières parties de ce chapitre seront consacrées à la présentation de l'hypothèse d'un déficit d'automatisation, proposée au départ des travaux menés par Nicolson et Fawcett dans la dyslexie.

MEMOIRE PROCEDURALE ET PATHOLOGIES ACQUISES

Les études ayant exploré les capacités de mémoire procédurale chez des enfants atteints de pathologies neurologiques acquises sont peu nombreuses. Ostergaard (1987) décrit le cas d'un patient devenu amnésique à l'âge de 10 ans à la suite d'un épisode d'anoxie ayant occasionné des lésions touchant la région hippocampique. En dépit de déficits marqués en mémoire déclarative, la mémoire procédurale était

préservée. Ward, Shum, Wallace et Boon (2002) s'intéressent quant à eux aux capacités de mémoire procédurale dans les suites d'un traumatisme crânien modéré à sévère. Ils testent 15 enfants traumatisés crâniens, âgés de 8 à 15 ans, sur une épreuve de poursuite de cible en mouvement (la tâche de poursuite rotative³⁹) ainsi qu'avec une tâche de lecture en miroir⁴⁰. Leurs résultats mettent en évidence que l'acquisition de nouvelles habiletés procédurales est intacte dans ce groupe de patients, contrairement à la mémoire déclarative, pour laquelle des déficits marqués sont observés.

Un trouble de la mémoire procédurale a par contre été observé, avec une tâche de temps de réaction sériel, chez 18 enfants présentant une tumeur acquise de la fosse postérieure touchant le cervelet et/ou ses connections (Quintero-Gallego, Gomez, Casares, Marquez, & Perez-Santamaria, 2006). Cette étude confirme l'importance de cette structure cérébrale dans la formation de nouvelles habiletés procédurales chez l'enfant. Toutefois, ce résultat n'a pas été confirmé par l'étude conduite par Edelstein et al. (2004) auprès de 88 enfants et adolescents présentant une malformation congénitale du cervelet. En effet, les résultats mettent en évidence un apprentissage procédural préservé à l'aide de la tâche de dessin en miroir.

Les capacités d'apprentissage procédural ont également été explorées par Mayor-Dubois et collaborateurs chez 18 enfants, âgés de 8 à 15 ans, présentant une atteinte des noyaux gris centraux (Mayor-Dubois, Maeder, Zesiger, & Roulet-Perez, 2010). En dépit de son rôle dans la formation d'habiletés procédurales (voir page 35), cette structure a été très peu étudiée dans le cadre de pathologies acquises durant l'enfance. Cette recherche, pionnière dans le domaine, met en évidence un déficit d'acquisition en mémoire procédurale, telle que mesurée par la tâche de temps de réaction sériel. Les difficultés étaient identiques entre tous les enfants du groupe clinique, que l'atteinte soit précoce (avant l'âge d'un an) ou tardive (après l'âge de 7 ans), et quelle que soit l'étiologie de la lésion. Pour les auteurs, ces résultats confortent

³⁹ La tâche de poursuite rotative utilise un matériel composé d'un disque en rotation sur lequel se trouve une cible. Le sujet doit essayer de maintenir la pointe d'un stylet sur cette cible en rotation. La variable mesurée est le temps de contact avec la cible, et ce pour chaque essai. L'apprentissage est révélé par une augmentation du temps de contact entre le stylet et la cible au fil des essais.

⁴⁰ Dans la tâche de lecture en miroir, les sujets doivent lire, aussi vite que possible, des mots écrits en miroir.

l'idée d'un développement très précoce des structures sous-tendant la mémoire procédurale. Ils montrent également l'absence de plasticité cérébrale en cas d'altération des régions sous-tendant ces capacités.

MEMOIRE PROCEDURALE ET TROUBLES DU DEVELOPPEMENT

Différentes voies de recherche suggèrent que les structures cérébrales impliquées dans l'acquisition et l'automatisation de nouvelles habiletés (à savoir, les noyaux gris centraux et le cervelet) sont particulièrement vulnérables face à des pathologies développementales (Bo & Lee, 2013). Dès lors, depuis plusieurs années, un nombre croissant de recherches s'intéressent aux phénomènes de mémoire procédurale dans toute une série de troubles du développement chez l'enfant.

Un déficit de mémoire procédurale a ainsi été mis en évidence dans certains désordres impliquant les régions fronto-striatales et cérébelleuses, comme c'est le cas dans l'autisme⁴¹ (voir par exemple, Gordon & Stark, 2007; Mostofsky, Goldberg, Landa, & Denckla, 2000). Toutefois, Brown, Aczel, Jiménez, Kaufman et Grant (2010) jettent un regard critique sur les méthodologies utilisées par Gordon et Stark ainsi que par Mostofsky et al. dans les études qu'ils ont menées auprès d'enfants autistes. Une de leurs critiques tient au fait que, dans ces deux expériences, les caractéristiques de la séquence utilisée ainsi qu'un intervalle stimulus-réponse plus long que de coutume (respectivement, 500 ms et 1500 ms) ont pu favoriser l'émergence d'une connaissance explicite⁴². Il est donc difficile de savoir si les différences obtenues entre les enfants autistes et les enfants de contrôle sont dues à des différences quant à leurs capacités d'apprentissage implicite en tant que telles ou si elles ne sont pas plutôt liées à leurs capacités d'apprentissage explicite, lesquelles sont plus efficaces chez les sujets de contrôle que dans le groupe clinique. Selon Brown et al., ces déficits dans les mécanismes explicites sont à mettre en lien avec le quotient intellectuel (QI) qui était globalement plus bas dans le groupe d'enfants autistes par rapport aux sujets de contrôle. Afin de minimiser le développement de connaissances explicites, Brown et al. ont administré une tâche de TRS avec une séquence probabiliste, ainsi que trois autres

⁴¹ Les résultats exposés dans ce paragraphe ne peuvent être généralisés à l'ensemble des troubles du spectre autistique puisque ces études n'incluent qu'un sous-groupe d'enfants autistes « de haut niveau » (dont le QI est normal) ou présentant un syndrome d'Asperger.

⁴² L'influence de ces facteurs méthodologiques a été discutée dans le chapitre 3, page 52.

épreuves d'apprentissage procédural : une tâche de grammaire artificielle, une épreuve d'apprentissage de classification probabiliste et une tâche d'apprentissage contextuel spatial. Les résultats mettent en évidence des capacités intactes d'apprentissage implicite pour l'ensemble des tâches administrées.

Des résultats équivalents, venant conforter l'idée que les capacités d'apprentissage procédural sont préservées dans l'autisme, ont été rapportés par Barnes et al. (2008) avec une tâche de TRS, ainsi que par deux autres études qui utilisent d'autres paradigmes d'apprentissage tels que la tâche de grammaire artificielle (voir par exemple, Kourkoulou, Leekam, & Findlay, 2012; Mayo & Eigsti, 2012). Gidley Larson et Mostofsky (2008) utilisent l'épreuve de poursuite rotative pour explorer les capacités d'apprentissage procédural dans plusieurs groupes d'enfants (enfants autistes, enfants présentant un trouble déficitaire de l'attention avec hyperactivité - TDAH et enfants de contrôle). Leurs résultats mettent en évidence un taux d'amélioration de la performance au cours des essais d'entraînement, similaire entre les trois groupes d'enfants. Toutefois, les auteurs relèvent, dans le groupe d'enfants autistes, des particularités dans la performance (par exemple, ils passent en général moins de temps sur la cible) qui suggèrent que les processus qui sous-tendent la performance diffèrent par rapport aux sujets de contrôle (et aux enfants TDAH). Ainsi, alors que l'habileté devient progressivement automatique pour le groupe contrôle et les enfants TDAH (indiquant que le recours aux processus explicites décroît), les sujets autistes continueraient à recruter les mécanismes explicites tout au long de la tâche afin de compenser des déficits dans les processus d'automatisation.

L'hypothèse d'un déficit de mémoire procédurale a également été considérée dans le syndrome de Williams, une affection génétique caractérisée par des anomalies cérébrales au niveau des noyaux gris centraux (Jernigan, Bellugi, Sowell, Doherty, & Hesselink, 1993) et du cervelet (Menghini et al., 2013). Deux études conduites par l'équipe de Stefano Vicari ont démontré la présence d'un déficit d'apprentissage procédural dans ce groupe, à l'aide de la tâche de TRS (Vicari, Bellucci, & Carlesimo, 2001; Vicari, Verucci, & Carlesimo, 2007). Enfin, la mémoire procédurale a également été testée dans le syndrome de Gilles de la Tourette, notamment parce que ce trouble moteur d'origine développementale implique un dysfonctionnement fronto-striatal.

L'apprentissage procédural moteur, mesuré à l'aide des tâches de dessin en miroir et de poursuite rotative, s'est révélé tout à fait préservé chez les enfants atteints de ce syndrome (Marsh, Alexander, Packard, Zhu, & Peterson, 2005). Par contre, ils présentaient un déficit dans la tâche d'apprentissage procédural cognitif⁴³, ce qui confirme l'idée selon laquelle les mécanismes sous-tendant les habiletés procédurales motrices *versus* cognitives diffèrent.

L'hypothèse d'un déficit de mémoire procédurale a également été suggérée dans les troubles spécifiques de l'apprentissage chez l'enfant tels que la dyslexie, la dysphasie, le TDAH et le trouble de l'acquisition de la coordination (voir par exemple, Mostofsky et al., 2000; Nicolson, Fawcett, & Dean, 2001; Ullman & Pierpont, 2005). Nous en présentons ici les fondements, en nous focalisant sur l'étude des enfants dyslexiques. Concernant le trouble de l'acquisition de la coordination, nous en abordons les aspects théoriques plus en détail dans le chapitre suivant.

Hypothèse d'un déficit de mémoire procédurale dans la dyslexie

Les travaux dirigés par Rod Nicolson et Angela Fawcett (1990; voir également Fawcett & Nicolson, 1992) auprès de sujets dyslexiques ont apporté les premiers arguments en faveur de l'hypothèse d'un déficit de la mémoire procédurale dans les troubles développementaux.

L'ambition de ces chercheurs était de proposer une théorie (*Automatization Deficit Hypothesis*) rendant compte de l'ensemble des déficits observés dans la dyslexie qui, au-delà de la sphère langagière, touchent également le domaine moteur (principalement, des problèmes d'équilibre et de coordination motrice)⁴⁴. Ils proposent ainsi l'idée que la dyslexie résulte d'une atteinte générale dans la capacité à automatiser de nouvelles procédures, tant cognitives que motrices. Pour rappel, l'automatisation est la phase ultime du processus d'apprentissage en mémoire procédurale, qui se développe graduellement à la suite d'une quantité importante de

⁴³ Les auteurs ont administré une tâche de classification nommée « weather prediction task » qui consiste à apprendre graduellement des associations probabilistes entre des stimuli et une réponse. Plus spécifiquement, une série d'indices est présentée au sujet et celui-ci doit « deviner » si ces indices prédisent la pluie ou le beau temps.

⁴⁴ Pour certains auteurs, toutefois, les déficits moteurs ne seraient présents que dans un sous-groupe d'enfants dyslexiques (Raberger & Wimmer, 2003; Ramus, Pidgeon, & Frith, 2003).

pratique (voir chapitre 1). Le caractère automatique d'une habileté est généralement démontré par le fait que la performance ne dépend plus de la disponibilité des ressources attentionnelles ; l'habileté peut alors être réalisée aisément, en même temps qu'une autre tâche (Chauvel et al., 2012).

L'hypothèse d'un déficit d'automatisation a été confirmée par une série d'expériences qui consistaient à demander aux enfants dyslexiques de réaliser deux tâches simultanément : une tâche motrice dite « principale » censée être automatisée (par exemple, une tâche d'équilibre sur une poutre) réalisée en même temps qu'une tâche « secondaire » (par exemple, compter à rebours ou répondre à un son). Les résultats de ces expériences montrent que l'ajout d'une tâche interférente perturbe les performances à la tâche principale uniquement dans le groupe d'enfants dyslexiques, ce qui suggère un déficit d'automatisation dans ce trouble (pour une revue, voir Nicolson & Fawcett, 2011).

Il s'agissait également, dans ce contexte, de lier les difficultés comportementales à une aire cérébrale clairement identifiée, le *cervelet* (Visser, 2007), qui est une des structures impliquées dans l'acquisition et l'automatisation de nouvelles habiletés (Doyon et al., 2003). Les auteurs postulent ainsi qu'un dysfonctionnement du cervelet est à l'origine des problèmes d'automatisation rencontrés dans ce trouble. Cette hypothèse dans la dyslexie est confirmée en imagerie cérébrale (Nicolson et al., 1999; Rae et al., 1998), mais également lors de l'administration de tests évaluant les fonctions cérébelleuses (comme par exemple, les tâches évaluant la stabilité posturale et le tonus musculaire; voir Fawcett, Nicolson, & Dean, 1996).

Nicolson et Fawcett (2007) mettent toutefois en garde face à cette hypothèse cérébelleuse. En effet, le cervelet est une large structure qui contient plus de la moitié des neurones du cerveau. Il est donc crucial de spécifier les régions du cervelet dont l'altération peut être reliée aux déficits qui sous-tendent la dyslexie. Par ailleurs, le cervelet pourrait ne pas être directement responsable du trouble. Dans un commentaire adressé directement à Nicolson, Zeffiro et Eden (2001) proposent que le cervelet pourrait davantage être un « innocent spectateur », plutôt que le composant responsable du trouble. En d'autres termes, le dysfonctionnement cérébelleux observé chez l'individu dyslexique pourrait être un reflet à distance du dysfonctionnement d'une

autre structure (touchant par exemple la région néocorticale périssylvienne). Le cervelet fonctionne en effet en association avec d'autres structures cérébrales qui, mises ensemble, orchestrent l'apprentissage des habiletés ainsi que leur réalisation. Par ailleurs, comme nous l'avons vu précédemment, un nombre important de structures cérébrales participent à l'apprentissage procédural, incluant notamment le striatum et les régions corticales motrices (Doyon & Benali, 2005). Il est dès lors possible que le cervelet ne soit pas la seule structure à l'origine des déficits observés et que d'autres structures ou d'autres connexions soient elles-mêmes la source des difficultés chez les enfants atteints de dyslexie (pour une revue, voir Orban, Lungu, & Doyon, 2008).

Ces dix dernières années, les travaux qui ont exploré les capacités de mémoire procédurale dans la dyslexie se sont multipliés. Ces recherches, qui utilisent principalement la tâche de temps de réaction sériel (TRS), conduisent toutefois à des résultats contradictoires. Certaines recherches confirment ainsi, de façon assez convaincante, la présence d'un déficit d'apprentissage procédural dans la dyslexie (voir par exemple, J. H. Howard, Jr., Howard, Japikse, & Eden, 2006; Vicari et al., 2005; Vicari, Marotta, Menghini, Molinari, & Petrosini, 2003) ; il existe néanmoins un nombre substantiel d'études qui montrent que les enfants dyslexiques peuvent apprendre la séquence aussi bien que leurs pairs (par exemple, Deroost et al., 2010; Gabay, Schiff, & Vakil, 2012; Russeler, Gerth, & Munte, 2006).

Comme nous l'avons exposé dans le chapitre précédent, l'apparente contradiction entre ces études pourrait dépendre de facteurs méthodologiques relatifs par exemple à la longueur de la séquence, à la durée de l'intervalle entre la réponse et le stimulus suivant, à la structure statistique des séquences ou encore, dans ce cas-ci, aux critères de sélection des enfants dyslexiques ainsi qu'à l'âge auquel les individus sont testés.

Dans une méta-analyse récente focalisée sur la tâche de TRS, Lum et al. (2013) montrent que, parmi les 14 études intégrées dans leur revue, la plupart mettent en évidence une altération de l'apprentissage procédural. Ce résultat représente ainsi un argument supplémentaire en faveur de l'hypothèse proposée par Nicolson et Fawcett. Selon les auteurs de l'étude, certains facteurs, tels que l'âge et la durée de l'entraînement, peuvent expliquer, pour une part, l'hétérogénéité des résultats entre toutes ces études. Ainsi, les difficultés peuvent être plus grandes quand les enfants

sont jeunes et que la durée de la phase d'entraînement est courte. Au contraire, les différences entre les groupes pourraient ne pas apparaître lorsque les participants sont plus âgés et exposés plus longtemps à la séquence d'apprentissage. Selon Lum et collaborateurs, ces derniers résultats pourraient s'expliquer par le fait que dans ces conditions, les sujets recourent à des stratégies explicites qui leur permettent de compenser leur difficulté en mémoire procédurale.

Vers une étiologie commune des troubles spécifiques de l'apprentissage chez l'enfant

Il existe un important recouvrement entre les différents troubles de l'apprentissage chez l'enfant. Plusieurs recherches ont ainsi montré que la dyslexie, la dysphasie, le TDAH et le TAC apparaissent fréquemment en concomitance (voir par exemple, Kaplan, Wilson, Dewey, & Crawford, 1998). Kaplan, Dewey, Crawford et Wilson (2001) montrent que la probabilité qu'un enfant dyslexique ait un trouble associé s'élève à 51,6%. Si l'enfant présente un TDAH, cette probabilité atteint les 80,4%. Au vu de ces résultats, la comorbidité au sein des troubles développementaux est souvent considérée comme étant « la règle plutôt que l'exception » (Kaplan et al., 1998, p. 484). En raison de cette coexistence fréquente, plusieurs auteurs ont proposé une étiologie commune aux cas de dyslexie, de dysphasie, de TAC et de TDAH. Dans ce contexte, trois théories ont été proposées : l'hypothèse du développement cérébral atypique (Gilger & Kaplan, 2001; Kaplan et al., 1998), l'hypothèse des déficits de l'attention, du contrôle moteur et de la perception (Gillberg & Kadesjo, 2000), et enfin, celle qui nous intéresse, l'hypothèse d'un déficit d'automatisation (Nicolson & Fawcett, 2007). Concernant cette dernière, les auteurs postulent que les troubles développementaux chez l'enfant sont sous-tendus par un déficit unique, touchant le système de mémoire procédurale. Leur modèle repose sur la distinction entre mémoire déclarative et procédurale, ainsi que sur les différents substrats neuronaux sous-tendant la mémoire procédurale (voir Figure 4). L'ambition des chercheurs était de proposer un modèle intégré permettant de rendre compte des différents troubles du développement chez l'enfant, avec d'un côté la mémoire déclarative qui serait responsable d'un trouble généralisé des apprentissages, et de l'autre côté la mémoire procédurale et ses deux circuits neuronaux (cortico-striatal et cortico-cérébelleux,

comme décrit par Doyon et al., 2003, voir page 38) responsables de la dyslexie, de la dysphasie, du trouble de l'acquisition de la coordination (TAC) et du trouble d'attention (TDA). Au sein de chacun de ces deux systèmes neuronaux, une distinction est établie selon que les circuits impliquent les aires corticales associées ou celles impliquées dans la motricité. Dès lors, quatre types de troubles pourraient émerger. Par exemple, le trouble de l'acquisition de la coordination serait dû à une anomalie au niveau de la boucle cortico-striatale motrice, alors que la dysphasie proviendrait d'une dysfonction de la boucle cortico-striatale langagière. Toutefois, les auteurs précisent que ces catégories diagnostiques sont amenées à évoluer car elles reposent principalement sur des distinctions neuro-anatomiques et beaucoup moins sur les aspects comportementaux. Or, comme nous le verrons dans le chapitre 5, les difficultés observées chez les enfants TAC dans une tâche d'adaptation prismatique (voir par exemple, Brookes, Nicolson, & Fawcett, 2007) suggèrent que le système cortico-cérébelleux est également altéré dans ce trouble.

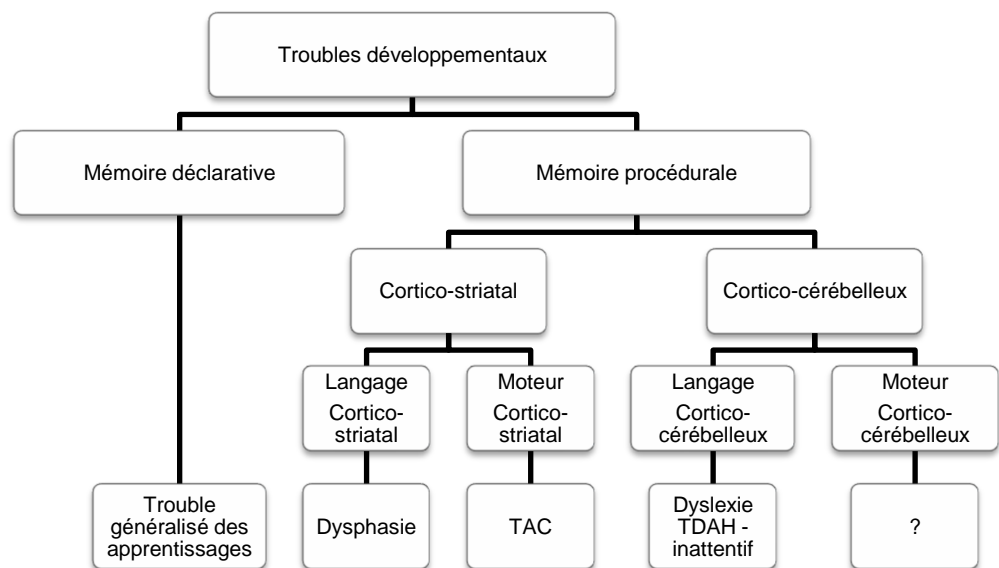


Figure 4. Modèle théorique des troubles de l'apprentissage, adapté de Nicolson et Fawcett (2007).

CONCLUSION

Bien que la mémoire procédurale ait généralement été décrite comme un système particulièrement robuste face aux pathologies cérébrales, dans le cadre de ce chapitre nous avons, au contraire, pu démontrer sa vulnérabilité dans de nombreuses pathologies développementales affectant les noyaux gris centraux et le cervelet. La recherche dans ce domaine en est encore à ses débuts et ne permet pas de tirer des conclusions définitives quant à la préservation *versus* l'altération de ces mécanismes dans les pathologies développementales. Ce champ d'étude présente pourtant un intérêt considérable pour la compréhension des différents troubles du développement chez l'enfant ; sur le plan cognitif, ce type de recherche permettra également de mieux cerner le développement de la mémoire procédurale durant l'enfance (notamment, en identifiant les éventuelles stratégies compensatoires qui sont mises en œuvre suite à son dysfonctionnement).

La fréquente comorbidité dans les troubles développementaux suggère l'existence d'une étiologie commune. Dans ce contexte, Nicolson et Fawcett (2007) ont proposé un modèle explicatif commun aux différents troubles de l'apprentissage chez l'enfant. Les réseaux neuronaux impliqués dans ces troubles diffèreraient dans la dyslexie, le TAC, la dysphasie et le TDA, ce qui permettrait de rendre compte d'un pattern de déficits distincts.

Etonnamment, comme nous l'aborderons dans le prochain chapitre, la capacité des enfants TAC à apprendre une nouvelle habileté motrice a été très peu explorée. De telles recherches s'avèrent pourtant être une voie prometteuse pour mieux comprendre les raisons du large pattern de déficits observés chez ces enfants.

CHAPITRE 5

MEMOIRE PROCEDURALE ET TROUBLE DE L'ACQUISITION DE LA COORDINATION

Nous débuterons ce chapitre par une description du trouble de l'acquisition de la coordination (TAC). Nous nous intéresserons ensuite à l'étiologie de ce trouble. Un large éventail de déficits pouvant être à l'origine du trouble ont été proposés dans la littérature ; nous aborderons les théories explicatives actuellement les plus influentes dans ce domaine. Nous clôturerons ce chapitre par la présentation détaillée de l'hypothèse d'un trouble de la mémoire procédurale qui peut aider à comprendre les difficultés motrices présentées dans le TAC.

TROUBLE DE L'ACQUISITION DE LA COORDINATION

Définition et caractéristiques

Tout ce que touche l'enfant tombe, se casse, se froisse, se salit, se déchire ; il échoue dans les activités manuelles de découpage, de collage, de coloriage et d'écriture. A la maison, les difficultés apparaissent au cours de l'habillage, des repas, de la toilette et peuvent ainsi créer une dépendance à l'adulte et constituer une gêne sociale non négligeable. Par ailleurs, l'apprentissage par l'entraînement est laborieux. L'enfant a beau répéter encore et encore les mouvements, s'entraîner, rien n'y fait : c'est comme si c'était toujours la première fois. Et le même mouvement, le même geste demande toujours autant de concentration et d'attention, il ne s'automatise pas.

Le trouble de l'acquisition de la coordination⁴⁵ (TAC) est défini, selon les critères du DSM-IV-TR (American Psychiatric Association, 2000 ; voir *Encart 3*), comme un trouble de la coordination motrice interférant de façon significative avec la réussite scolaire ou les activités de la vie quotidienne. Le trouble apparaît chez des enfants d'intelligence normale, en l'absence de trouble neurologique identifié. Il se manifeste principalement par une grande maladresse dans les activités qui requièrent précision et rythme, mais il est également caractérisé par des retards importants dans l'acquisition de certaines habiletés motrices (comme par exemple l'écriture).

Le TAC a souvent été décrit comme un « trouble invisible », notamment parce que les difficultés peuvent passer inaperçues chez le jeune enfant. Eventuellement, celui-ci peut être considéré comme un peu maladroit, faisant souvent tomber les objets et n'étant pas attiré par les jeux de construction et les activités manuelles en général, mais son aisance de parole masque souvent, du moins pendant un certain temps, son véritable trouble. Par contre, avec le passage à l'école maternelle ou primaire, les difficultés deviennent manifestes. C'est généralement au cours de la troisième maternelle que les parents sont alertés par les enseignants qui constatent les lacunes de l'enfant dans les activités de dessin, de bricolage et d'écriture. Alors seulement, les parents peuvent faire le rapprochement avec les maladresses de l'enfant à la maison et se tourner vers un spécialiste.

⁴⁵ Traduction de « Developmental Coordination Disorder ».

Encart 3 : Critères pour le diagnostic du TAC, DSM-IV-TR (APA, 2000)

[A] Les performances dans les activités quotidiennes nécessitant une bonne coordination motrice sont nettement au-dessous du niveau escompté compte tenu de l'âge chronologique du sujet et de son niveau intellectuel (mesuré par des tests). Cela peut se traduire par des retards importants dans les étapes du développement psychomoteur (p. ex. ramper, s'asseoir, marcher), par le fait de laisser tomber des objets, par de la « maladresse », de mauvaises performances sportives ou une mauvaise écriture.

[B] La perturbation décrite dans le Critère A interfère de façon significative avec la réussite scolaire ou les activités de la vie courante.

[C] La perturbation n'est pas due à une affection médicale générale (p. ex. infirmité motrice cérébrale, hémiplégie ou dystrophie musculaire), et ne répond pas aux critères d'un trouble envahissant du développement.

[D] S'il existe un retard mental, les difficultés motrices dépassent celles habituellement associées à celui-ci.

Le terme TAC inclut un large spectre de difficultés qui touchent, de façon variable, la motricité fine et/ou la motricité globale. Parmi les signes d'appel les plus pertinents, notons une dissociation importante entre les compétences verbales de l'enfant et sa capacité à manipuler des objets. Les difficultés motrices les plus couramment rapportées concernent les activités d'écriture, de dessin, de coloriage, d'habillage (particulièrement, le boutonnage et le laçage des chaussures) et l'utilisation d'ustensiles (notamment les couverts, les ciseaux). La réalisation de ces gestes semble non seulement difficile, lente et malhabile, mais aussi coûteuse sur le plan cognitif, ce qui conduit à une fatigue intense au cours de la journée. Par ailleurs, des déficits sur le plan visuo-spatial peuvent également s'ajouter : l'enfant éprouve notamment des difficultés à situer les objets dans l'espace ou à les positionner les uns par rapport aux autres. Au niveau de la motricité globale, des retards psychomoteurs (s'asseoir, ramper, marcher) sont parfois rapportés. De plus, l'enfant apprend difficilement à rouler à vélo ou à sauter à la corde. Il est peu habile dans les jeux de balle et dans la pratique des sports (Geuze, 2005a).

Parmi l'ensemble des troubles qui affectent les enfants TAC, Geuze (2005b) tente de dégager les principales difficultés motrices présentées dans ce groupe, en identifiant trois catégories de symptômes. La première concerne le *contrôle postural* et se caractérise par une hyper- ou une hypotonie ainsi que par des troubles de l'équilibre. La seconde catégorie renvoie à des problèmes de *coordination motrice* qui se manifestent par une mauvaise coordination entre les membres, par des difficultés à réaliser des mouvements en séquence et à utiliser les feedback, mais également par des troubles dans les processus d'anticipation, de planification et de contrôle du mouvement. Cela se traduit par des mouvements incorrects, plus lents, moins fluides ou par une plus grande variabilité dans la performance motrice. Enfin, la troisième classe de symptômes concerne les *apprentissages moteurs* et renvoie aux difficultés qu'on les enfants TAC à apprendre de nouvelles habiletés et à s'adapter à des changements de l'environnement. Elle concerne également les difficultés d'automatisation souvent rencontrées dans cette population.

Les symptômes décrits dans le TAC se retrouvent au travers de différents groupes ethniques ou culturels, quel que soit le contexte socio-économique, chez les garçons comme chez les filles (Zoia, Barnett, Wilson, & Hill, 2006). Une nette prédominance masculine a toutefois été constatée, avec un ratio, selon les études, de deux à sept garçons pour une fille (Blank, Smits-Engelsman, Polatajko, & Wilson, 2012; Lingam, Hunt, Golding, Jongmans, & Emond, 2009). Cette prédominance masculine n'est cependant pas spécifique au TAC, puisqu'on la retrouve dans les autres troubles développementaux (Berquin, Querne, & Vernier-Hauvette, 2010).

On estime que le trouble de l'acquisition de la coordination touche environ 6 % des enfants âgés de 5 à 11 ans (APA, 2000)⁴⁶. Le TAC est généralement décrit comme une condition chronique et habituellement permanente (Polatajko, Fox, & Missiuna, 1995). Des données scientifiques démontrent que les difficultés motrices persistent, dans plus de la moitié des cas, jusqu'à l'adolescence et l'âge adulte (par exemple, Cantell, Smyth, & Ahonen, 2003; voir également pour une revue, Cantell & Kooistra, 2002). Par ailleurs, les conséquences de ce trouble sont importantes et multiples, touchant la sphère scolaire, familiale, sociale et affective.

Une des conséquences principales est la mauvaise adaptation au système scolaire et les échecs répétés. La manipulation des outils scolaires ainsi que l'écriture sont laborieuses et mobilisent toutes les ressources attentionnelles de l'enfant. Recopier la leçon du tableau, prendre notes dans son journal de classe, entourer la bonne réponse à un contrôle, prendre son cahier dans la mallette accaparent les ressources attentionnelles de l'enfant, ne lui laissant pas l'opportunité de se concentrer sur l'essentiel (par exemple, le contenu de la leçon). De plus, il n'est pas rare que les enfants souffrent, en association avec le TAC, d'autres troubles, par exemple en lien avec l'apprentissage (troubles de la lecture, difficultés en mathématiques), qui viennent se greffer sur les difficultés motrices déjà existantes. Sur le plan psychosocial, les enfants TAC évitent généralement les activités sportives, qui les mettent en difficulté. Ils refusent de jouer au ballon durant la récréation ou prétextent qu'ils n'aiment pas sauter à la corde pour éviter les moqueries de leurs camarades. En conséquence, les enfants TAC sont souvent perçus comme plus passifs, isolés, moins sociables ou moins bien intégrés dans le groupe. De plus, l'enfant présente fréquemment une diminution de l'estime de soi et des sentiments d'auto-dévalorisation souvent alimentés par des remarques ou moqueries en provenance de ses camarades. Parfois, en raison d'une méconnaissance du trouble, l'enfant subit également des remarques négatives de la part des enseignants qui associent son travail écrit à un travail « peu soigné », « bâclé ». L'enfant sera traité de « fainéant » alors qu'il a probablement mis tous ses efforts pour le réaliser... Dans ce contexte, il peut arriver que ces enfants développent des troubles dépressifs et anxieux, ainsi qu'une phobie, voire un rejet total, de l'école.

⁴⁶ Toutefois, la prévalence du trouble de l'acquisition de la coordination est sujette à discussion (les chiffres s'étendent de 1,8% à 19% selon les études) du fait de l'absence de consensus sur sa définition et ses critères diagnostiques.

En règle générale, les enfants atteints de TAC forment un groupe hétérogène puisqu'ils diffèrent sur le plan de la nature et de la sévérité des manifestations cliniques. Ce constat a conduit certains auteurs à proposer l'existence de différents sous-types dans le TAC⁴⁷ (Albaret, Carayre, Soppelsa, & Michelon, 1995; Hoare, 1994; Vaivre-Douret et al., 2011), mais, à l'heure actuelle, la définition de ces sous-types reste floue et leur étiologie inconnue (pour des revues, voir Visser, 2003, 2007). Par ailleurs, le TAC pur est rare et présente une comorbidité fréquente, particulièrement avec le trouble déficitaire de l'attention (TDA/H)⁴⁸ et les troubles des apprentissages (voir par exemple, Kaplan et al., 1998). Ces éléments d'hétérogénéité et de comorbidité compliquent évidemment le diagnostic du TAC, de même que l'identification des mécanismes à l'origine du trouble.

Un autre élément qui participe à la confusion qui entoure la définition et la caractérisation du TAC concerne celui de sa terminologie. En effet, depuis leurs premières descriptions, les difficultés motrices de l'enfant ont été décrites au travers d'une multitude d'appellations, faisant ainsi écho à la grande diversité des tableaux cliniques observés dans ce trouble. Parmi les termes les plus utilisés, on retrouve, pour n'en citer que quelques-uns, « retard psychomoteur », « trouble spécifique du développement moteur », « maladresse », et plus récemment, « dyspraxie » et « trouble de l'acquisition de la coordination » (voir pour une revue, Henderson & Henderson, 2003). Dans les milieux cliniques (notamment francophones), c'est clairement l'appellation dyspraxie, par analogie à l'apraxie chez l'adulte⁴⁹, qui est préférée pour décrire une inhabilité à planifier, organiser et coordonner les mouvements nécessaires à l'exécution d'une action volontaire (Gibbs, Appleton, & Appleton, 2007). Toutefois, la définition de la dyspraxie ne fait pas l'unanimité. En effet, ce terme est autant utilisé en tant que synonyme que comme sous-type du TAC. Selon ce dernier point de vue, les troubles des enfants dyspraxiques ne toucheraient qu'une

⁴⁷ Par exemple, dans l'étude de Vaivre-Douret et al. (2011), deux patterns de dyspraxie pure ont été mis en évidence : l'une idéomotrice (qui représente 12% des enfants testés) et l'autre visuo-spatiale/visuo-constructive (44% des enfants testés), ainsi qu'une dyspraxie mixte avec comorbidité (44%).

⁴⁸ Une étude réalisée auprès de familles de jumeaux montre une étiologie génétique commune aux deux troubles (Martin, Piek, & Hay, 2006)

⁴⁹ Bien que ces deux entités se rejoignent dans leurs manifestations, leur étiologie est différente ; elle est lésionnelle pour l'apraxie tandis qu'elle correspond à un défaut dans la mise en place des praxies au cours du développement (sans site lésionnel identifié) dans le cadre de la dyspraxie développementale (Berquin et al., 2010).

partie des gestes (à savoir, les gestes acquis dans un contexte culturel donné⁵⁰), alors que le TAC engloberait l'ensemble des troubles du geste (c'est-à-dire tant les gestes déterminés génétiquement que les gestes culturels acquis par apprentissage ; Mazeau, 2006). Un consensus international, regroupant quarante-trois experts (rapporté par Polatajko et al., 1995), statue sur l'utilisation du terme *Developmental Coordination Disorder* (ou sa traduction française « Trouble de l'Acquisition de la Coordination ») pour caractériser les enfants qui présentent des troubles du mouvement et de l'organisation visuo-spatiale. Dans ce travail de thèse, nous adoptons cette terminologie, laquelle est actuellement la plus utilisée sur le plan scientifique international et également reprise dans la classification du DSM.

Malgré ces recommandations, la majorité des cliniciens continuent à utiliser le terme de « dyspraxie » pour décrire un trouble spécifique du geste acquis. Ce manque de consensus sur une question aussi essentielle que celle de la terminologie utilisée pour définir les troubles de la coordination motrice participe, pour une grande part, au flou qui accompagne la caractérisation et la compréhension de ce trouble développemental. En effet, l'utilisation de termes variés limite les comparaisons entre les études ainsi que la communication entre chercheurs et cliniciens, ce qui représente un véritable frein aux avancées scientifiques dans ce domaine (Magalhaes, Missiuna, & Wong, 2006).

Sur le plan du diagnostic, malgré l'apport considérable de la classification du DSM, l'identification des enfants TAC reste encore difficile et extrêmement variable selon les études (mais également dans les milieux cliniques) en termes de critères d'inclusion et d'exclusion. Cela peut en partie être expliqué par le fait que les critères diagnostiques issus du DSM ne nous informent pas sur la nature précise ni même la sévérité des troubles de la coordination. De plus, aucune indication n'est donnée sur la façon d'évaluer les déficits de coordination de l'enfant ainsi que leur impact dans la vie quotidienne. Une méta-analyse réalisée par Geuze, Jongmans, Schoemaker, Smits Engelsman et Bouwien (2001) sur 176 études publiées révèle la grande diversité des critères de sélection pour identifier les enfants TAC. Cette revue montre, par exemple, que dans 40 % des recherches, l'utilisation de critères d'exclusion n'est pas spécifiée. Dans les cas où ces critères sont présents (par exemple, exclusion des troubles sensoriels ou neurologiques), la manière dont ils sont identifiés est rarement détaillée, à l'exception du quotient intellectuel. Concernant les critères d'inclusion, la batterie M-

⁵⁰ Comme par exemple l'utilisation des couverts *versus* des baguettes chinoises, qui doit faire l'objet d'un apprentissage.

ABC (*Movement Assessment Battery for Children* ; voir *Encart 4*) est actuellement la plus utilisée sur le plan international (64 % des études) pour confirmer le diagnostic. Elle est considérée comme la plus pertinente pour dépister les enfants atteints de TAC (Geuze et al., 2001). Seulement, dans beaucoup d'études, aucune information n'est fournie quant au score seuil utilisé pour considérer la performance comme étant déficitaire. Et quand un score seuil est présenté, celui-ci varie entre le percentile 5 et le percentile 20. Sur base de ce constat, les auteurs proposent une série de recommandations en vue d'une meilleure identification des enfants atteints de TAC. Ils définissent ainsi, comme critère quantitatif, un QI supérieur à 70⁵¹ ainsi qu'une note seuil fixée au 5^{ème} percentile sur un test standardisé évaluant la motricité fine et globale des enfants TAC. Les auteurs précisent également qu'une note en-dessous du score seuil ne doit pas être l'unique critère qui détermine le diagnostic, mais, comme le préconise le DSM-IV-TR, la prise en compte de l'impact des troubles dans la vie quotidienne participe également à la décision diagnostique.

⁵¹Toutefois, la plupart des études sur le TAC utilisent la note seuil de 80 (Geuze, 2005a).

Encart 4 : La batterie d'évaluation du mouvement chez l'enfant - M-ABC (Henderson & Sugden, 1992 ; Soppelsa & Albaret, 2004, pour la version française⁵²).

La batterie d'évaluation du mouvement chez l'enfant constitue un outil de référence pour l'évaluation des capacités psychomotrices des enfants de 4 à 12 ans. Des items spécifiques et différents, mais mesurant les mêmes processus sont proposés pour chaque tranche d'âge (4-5-6 ans ; 7-8 ans ; 9-10 ans ; 11-12 ans). Cette batterie évalue le contrôle corporel, le fonctionnement des membres, la précision spatiale, le contrôle de la force et la synchronisation des actions au travers de trois catégories de subtests : dextérité manuelle, maîtrise de balles et équilibre statique et dynamique. Pour chaque subtest, la transformation des données brutes en notes standard permet de calculer un score pour chaque catégorie ainsi qu'une « note totale de dégradation ».

La batterie contient également un questionnaire, destiné à un proche de l'enfant (le plus souvent, ses parents), qui permet d'estimer les difficultés motrices que rencontre l'enfant dans sa vie quotidienne. Il comprend 48 questions réparties en quatre sections qui sont fonction du type d'interaction entre l'enfant (immobile ou en déplacement) et l'environnement (stable ou changeant).

Etiologie

Compte tenu de la prévalence importante dans la population et des conséquences sérieuses sur la vie de l'enfant, le TAC suscite depuis plusieurs années de nombreuses questions, mais, à l'heure actuelle, son origine précise reste inconnue.

Certaines variables environnementales sont considérées comme des facteurs de risque pour le développement du TAC. Ainsi, plusieurs études indiquent que des complications durant la grossesse ou durant l'accouchement, la présence d'une prématurité, mais surtout, le faible poids à la naissance et le sexe masculin peuvent constituer des facteurs de risque pour le développement de ce trouble (voir par exemple, Zwicker et al., 2013). Des travaux en neuro-imagerie mettent en évidence un taux élevé d'anomalies cérébrales parmi les enfants TAC en comparaison à des enfants de contrôle comme, par exemple, une atrophie corticale, une démyélinisation, une dilatation ventriculaire ou encore une réduction du volume du corps calleux (Knuckey, Apsimon, & Gubbay, 1983; Vaivre-Douret, 2002). Comme nous le verrons

⁵² Cette batterie a été traduite et étalonnée dans de nombreux pays (Pays-Bas, Suède, Danemark, Italie, Japon, etc.).

dans les sections suivantes, les quelques études en imagerie fonctionnelle révèlent un déficit d'activité au niveau de certaines régions cérébrales (comme par exemple, le cervelet). Sur le plan électrophysiologique, les études EEG montrent des indices de préparation motrice plus importante ainsi qu'une latence plus longue de l'onde N100 sur des tâches de synchronisation⁵³ (voir pour une revue, Albaret & Chaix, 2011). Les auteurs postulent que la diminution de la vitesse de conduction dans les circuits neuronaux pourrait être due à un retard de myélinisation ou à une moins bonne synchronisation des groupes de neurones sous-jacents.

Des facteurs génétiques pourraient également jouer un rôle dans la genèse de ce trouble. On manque toutefois de données précises en regard de cette hypothèse. Francks et al. (2003) investiguent les relations génétiques entre les performances en lecture, les habiletés motrices manuelles et la latéralisation. Ils montrent que les performances motrices manuelles sont corrélées de manière significative au sein de la famille, suggérant une influence génétique.

En résumé, à ce jour, la véritable étiologie du trouble de l'acquisition de la coordination est inconnue. Toutefois, comme c'est le cas dans d'autres troubles développementaux, il a été suggéré un défaut dans la mise en place de certains circuits cérébraux qui pourrait être lié à des facteurs génétiques, neurobiologiques et/ou environnementaux.

⁵³ Le paradigme le plus utilisé pour étudier la synchronisation (ou « timing ») est la tâche de tapping qui consiste à suivre un tempo indiqué par un métronome (ou un stimulus visuel) en tapant avec l'index. Quand le sujet parvient à être synchronisé, il doit essayer de reproduire le rythme en l'absence du signal auditif/visuel (Greene & Williams, 1993).

Théories explicatives du trouble de l'acquisition de la coordination

Un large éventail de déficits pouvant être à l'origine du trouble de l'acquisition de la coordination ont été proposés, tels que des troubles proprioceptifs, kinesthésiques, des troubles de la perception visuelle, de la planification, de l'exécution des mouvements, de la synchronisation et/ou de la régulation de la force des mouvements, des troubles de la modélisation interne, des troubles du transfert inter-hémisphérique, des troubles de la mémoire de travail, des troubles de la mémoire procédurale, etc. Avant d'envisager la théorie d'un déficit de la mémoire procédurale qui fait l'objet de ce travail de thèse, nous décrivons ci-dessous, de façon très synthétique, les conceptions théoriques actuellement les plus influentes dans le domaine.

TAC : un trouble du traitement de l'information ?

Selon les théories du traitement de l'information, la production d'un geste implique différents traitements tels que la perception, la planification de l'action, la programmation de la réponse motrice appropriée, la sortie comportementale et le contrôle rétroactif. Dans ce contexte, les troubles moteurs rencontrés par les enfants TAC trouvent leur origine dans l'altération d'une de ces étapes du traitement de l'information. L'essentiel des débats s'est longtemps polarisé autour de la question de l'origine perceptive *versus* motrice du TAC. Du côté perceptif, les difficultés motrices sont dues à des troubles du traitement perceptif (par exemple, déficits dans le traitement visuel, la sensibilité kinesthésique, etc.) qui précède l'exécution du mouvement. *A contrario*, du côté moteur, les déficits se situent dans les étapes de planification, de programmation et d'exécution du mouvement (voir Wilson & Butson, 2005).

Les résultats d'une méta-analyse regroupant cinquante études publiées entre 1974 et 1996 révèlent que le déficit le plus consistant dans le TAC est celui touchant la sphère visuo-spatiale, que la réponse soit motrice ou non (Wilson & McKenzie, 1998). Des difficultés sur le plan de la perception visuelle et kinesthésique étaient également révélées dans la plupart des études. Cette méta-analyse, maintes fois citée, appuie ainsi l'idée, proposée initialement par les travaux pionniers de Ayres (1972), selon laquelle des déficits au niveau du traitement perceptif sont à l'origine des difficultés de

coordination motrice. Plusieurs travaux ont fourni des données convergentes en faveur de cette hypothèse (voir par exemple, les travaux de Mon-Williams, Wann, & Pascal, 1999; Sigmondsson, Hansen, & Talcott, 2003; Wilson & Maruff, 1999).

La théorie proposée par Ayres (1972), qui reste à l'heure actuelle très influente, postule un défaut d'intégration des informations sensorielles (notamment, celles provenant des systèmes vestibulaires, proprioceptifs et tactiles) à l'origine des troubles de la coordination présents dans le TAC. Selon ce point de vue, l'enfant TAC aurait des difficultés pour analyser correctement les informations sensorielles en provenance de l'environnement, ce qui affecterait sa capacité à planifier des mouvements nouveaux ou inhabituels et à les exécuter. Les enfants TAC peuvent ainsi maîtriser certaines activités qui ont été pratiquées régulièrement, mais présenteraient des difficultés pour généraliser l'habileté acquise à d'autres activités motrices similaires.

Toutefois, du côté moteur, certains auteurs remettent en question le point de vue selon lequel des troubles de la perception seraient à l'origine du TAC (Schoemaker et al., 2001; Van Waelvelde, De Weerd, De Cock, & Smits-Engelsman, 2004). Par exemple, Schoemaker et collègues concluent que la composante motrice, présente dans des tâches visuo-motrices, contribue davantage aux difficultés des enfants TAC que la composante perceptive.

Une étude en neuro-imagerie réalisée par Vaivre-Douret et ses collaborateurs (2011) conclut que des troubles de planification et de programmation, d'origine sous-corticale (impliquant le thalamus, les noyaux gris centraux, mais également le cervelet), sont au cœur des problèmes présentés par les enfants atteints d'une « dyspraxie pure » (idéomotrice ou visuo-spatial/visuo-constructive⁵⁴).

⁵⁴ La dyspraxie idéomotrice est caractérisée par des déficits touchant les praxies digitales, les gnosopraxies et les gnoses digitales. La dyspraxie visuo-spatiale/constructive est caractérisée par des déficits dans l'intégration visuomotrice, la structuration visuo-spatiale et des troubles visuo-spatiaux constructifs.

TAC : un trouble de modélisation interne ?

Dans une toute autre perspective, certains auteurs, inspirés par les modèles neurocomputationnels du contrôle moteur⁵⁵, postulent qu'un déficit de la représentation interne des actes moteurs est à l'origine du TAC (voir pour une revue, Wilson & Butson, 2005). Selon ce point de vue, actuellement très répandu, les enfants atteints de TAC éprouvent des difficultés à se représenter mentalement la manière dont un mouvement est censé se dérouler. En conséquence, les enfants TAC seraient plus dépendants des feedbacks afférents lors de l'ajustement des mouvements volontaires.

Différents paradigmes ont été utilisés pour rendre compte de cette difficulté. Tous impliquent de construire une représentation interne des mouvements volontaires. Un exemple est le paradigme d'imagerie motrice qui requiert de simuler mentalement la réalisation d'un acte moteur. Selon de nombreuses études, les actions imaginées sont soumises aux mêmes contraintes (timing, précision) que les actions réellement réalisées. En effet, il a été montré que la performance à des tâches réelles *versus* imaginées activait des régions cérébrales identiques.

Dans ce contexte, différentes recherches fournissent des preuves convergentes suggérant un déficit de la représentation interne des mouvements volontaires chez l'enfant TAC (voir par exemple, Katschmarsky, Cairney, Maruff, Wilson, & Currie, 2001; Maruff, Wilson, Trebilcock, & Currie, 1999; Wilson & Maruff, 1999). Pour les auteurs, cette théorie fournirait une explication à la lenteur et à la variabilité des performances qui caractérisent généralement les enfants TAC dans la plupart des tâches motrices.

⁵⁵ Cette théorie est basée sur le postulat selon lequel le SNC utilise des modèles internes (représentant les différents états de son propre corps et de l'environnement extérieur) pour anticiper et contrôler les mouvements volontaires (voir Wilson & Butson, 2005 pour une description détaillée concernant le modèle neurocomputationnel du contrôle moteur).

TAC selon la théorie de l'apprentissage moteur

Récemment, Ahonen, Kooistra, Viholainen et Cantell (2004) ont proposé que les enfants présentant des troubles moteurs d'origine développementale seraient affectés par un trouble commun de l'apprentissage moteur. En se basant sur la théorie de l'apprentissage moteur proposée par Willingham (1998, voir page 20), les auteurs postulent que les difficultés motrices manifestées par ces enfants reflètent une difficulté dans l'apprentissage et la production de nouvelles habiletés et/ou dans la généralisation de l'habileté acquise à d'autres situations. Le modèle proposé reprend les trois grands principes formulés par Willingham (voir

Figure 5) :

[1] Le principe de **séparabilité neurale** postule que les différents composants cognitifs qui contribuent au contrôle du mouvement soient sous-tendus par des aires anatomiques distinctes. Quatre processus différents sont ainsi supposés sous-tendre le contrôle moteur. (a) Les *processus stratégiques*, sous la dépendance du cortex frontal dorsolatéral, permettent d'identifier le but de l'activité motrice. (b) Les *processus d'intégration perceptivo-motrice*, sous la dépendance du cortex pariétal postérieur, permettent de développer des représentations qui servent pour la sélection des cibles pour les mouvements. (c) Les processus séquentiels, sous la dépendance des noyaux gris centraux et de l'aire motrice supplémentaire, permettent d'ordonner les mouvements en une séquence. (d) Les processus dynamiques, sous la dépendance de la moelle épinière, correspondent à l'innervation des muscles. Ahonen et al. ajoutent deux processus pris en charge par le cervelet : le contrôle postural et le timing.

[2] Le principe de **représentation différenciée** propose que les différents composants cognitifs utilisent différentes formes de représentations lors de la planification d'une activité complexe (comme par exemple, l'espace allocentrique, relatif aux objets extérieurs *versus* égocentriques, relatifs au corps).

[3] Le **principe du « dual-mode »** (qui a été présenté dans le chapitre 1) est centré sur l'idée qu'une tâche motrice peut être réalisée soit dans un mode conscient (« effortfull mode »), soit dans un mode inconscient (« automatic mode »). Les deux peuvent être activés à tout moment en fonction notamment du degré de familiarité avec la tâche.

Sur base de ce modèle, Ahonen et ses collaborateurs proposent qu'une atteinte de l'un des composants du système puisse être à l'origine de manifestations différentes des troubles de l'apprentissage moteur. Ce modèle, bien qu'encore hypothétique et essentiellement théorique, ouvre de nouvelles perspectives dans la compréhension de

l'origine des troubles dans le TAC en offrant la possibilité de situer les problèmes rencontrés par l'enfant à différents niveaux. Cela permettrait d'expliquer, pour une part, l'hétérogénéité des troubles généralement décrits dans le TAC.

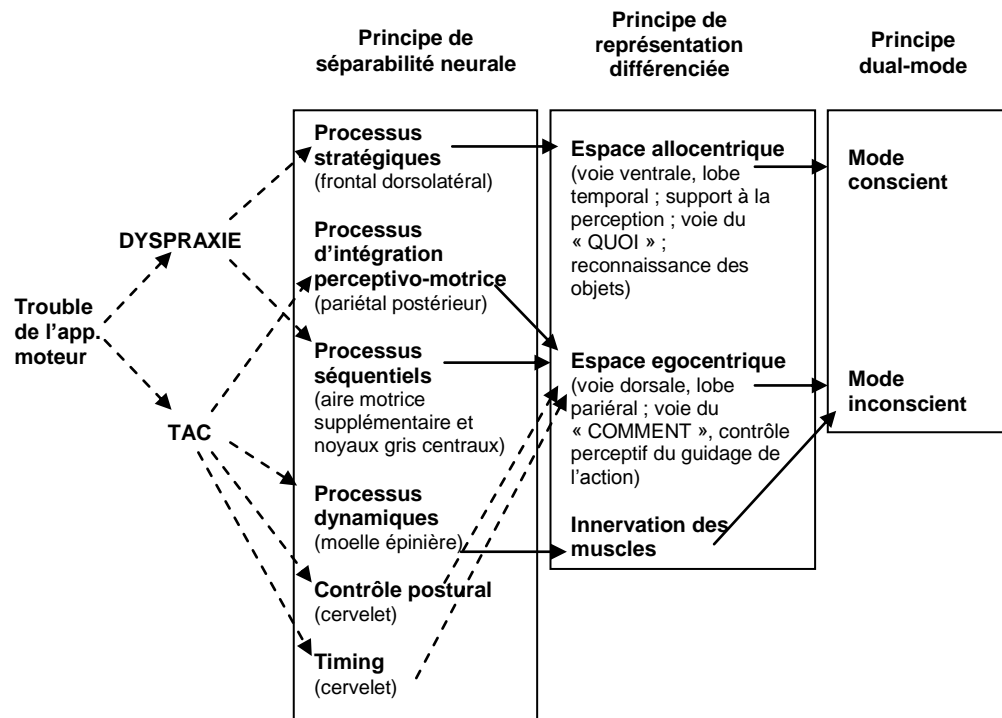


Figure 5. Processus impliqués dans le trouble de l'apprentissage moteur, inspiré de la théorie de Willingham (1998). Les lignes en pointillés représentent les propositions faites par Ahonen et collaborateurs. Adapté de Ahonen et al. (2004).

Note. Le terme de « dyspraxie » est utilisé, dans ce cas-ci, comme une entité distincte du TAC.

LE TAC SELON L'HYPOTHESE D'UN DEFICIT DE LA MEMOIRE PROCEDURALE

Comparativement au nombre d'études réalisées ces dix dernières années auprès d'enfants dyslexiques, l'hypothèse d'un déficit d'apprentissage procédural, proposée par Nicolson et Fawcett (2007), n'a guère été exploitée dans le TAC. Dans les paragraphes qui suivent, nous présentons les études qui, de près ou de loin, se sont intéressées aux liens existant entre le TAC, la mémoire procédurale et les corrélats cérébraux possibles.

Corrélats cérébraux

Les structures cérébrales qui sont impliquées dans la mémoire procédurale (principalement, le cervelet, les noyaux gris centraux et le cortex pariétal) ont fait l'objet d'une attention particulière dans le trouble de l'acquisition de la coordination. Ainsi, un petit nombre d'études récentes postulent que l'une ou l'autre de ces régions puisse être impliquée dans la pathogenèse du TAC (voir pour des revues récentes, Bo & Lee, 2013; Zwicker, Missiuna, Harris, & Boyd, 2012).

Cervelet

En raison du rôle joué par le cervelet dans les fonctions motrices, le lien entre cette structure et le TAC paraît, à bien des égards, plus évident qu'il ne l'était dans la dyslexie. Il est cependant assez étonnant de constater que le déficit cérébelleux est loin d'être l'hypothèse dominante dans le TAC.

Quelques travaux en neuro-imagerie ont mis en avant des anomalies cérébrales touchant, notamment, le cervelet. Zwicker, Missiuna, Harris et Boyd (2010) explorent l'activité cérébrale de 7 enfants TAC et de 7 enfants de contrôle durant la réalisation d'une tâche visuo-motrice qui implique de tracer un trait, à l'aide d'un joystick, à l'intérieur d'une forme représentant une fleur⁵⁶, et ce durant deux minutes. Les données montrent que les enfants TAC activent davantage les régions frontales, temporales et pariétales que les enfants de contrôle dont les activations cérébrales semblent principalement localisées dans la région du précuneus gauche (gyrus de la face interne

⁵⁶ La tâche est une adaptation de l'épreuve du dessin de la fleur incluse dans la batterie M-ABC.

du lobe pariétal). Bien qu'aucune différence de performance ne fût mise en avant dans la tâche du dessin, les enfants TAC activent deux fois plus de régions cérébrales que les enfants de contrôle durant sa réalisation. Ces résultats suggèrent que les enfants du groupe clinique doivent fournir plus d'efforts pour planifier et exécuter l'activité motrice, ce qui est consistant avec les observations cliniques, faites par l'expérimentateur, d'une plus grande fatigabilité dans ce groupe d'enfants.

Un an plus tard, cette même équipe de chercheurs (Zwicker, Missiuna, Harris, & Boyd, 2011) publie une seconde recherche avec le même groupe d'enfants afin d'explorer cette fois les effets d'un apprentissage moteur sur l'activité cérébrale des enfants. Les données en imagerie fonctionnelle sont ainsi récoltées à la suite d'un entraînement intensif de la tâche de dessin. Les résultats démontrent cette fois une *sous-activation* dans les circuits cérébelleux-pariétal et cérébelleux-préfrontal chez les enfants TAC par rapport aux contrôles. En parallèle, les données comportementales montrent une absence d'amélioration au niveau de la performance qualitative (c'est-à-dire, le nombre de fois où le curseur sortait du tracé) après trois jours d'entraînement à la tâche⁵⁷.

Une atteinte du cervelet a également été mise en évidence, à l'aide des données en neuro-imagerie, dans l'étude clinique d'une patiente âgée de 19 ans présentant un TAC (Marien, Wackenius, De Surgeloose, De Deyn, & Verhoeven, 2010).

Plusieurs études comportementales vont également dans le sens d'un dysfonctionnement cérébelleux dans le TAC. Elles incluent les recherches portant sur le contrôle postural (Geuze, 2005b), l'adaptation motrice (voir infra) et le contrôle temporel des mouvements (synchronisation ou « timing » moteur ; voir par exemple, Lundy-Ekman, Ivry, Keele, & Woollacott, 1991; Rosenblum & Regev, 2013). Pris dans leur ensemble, les résultats de ces recherches mettent en évidence une plus grande variabilité des réponses, de même qu'une lenteur dans la performance motrice des enfants TAC comparativement aux enfants de contrôle. Les enfants TAC ont également tendance à répéter le même mouvement, sans corriger leurs erreurs, tout comme cela est observé chez les patients présentant une atteinte au niveau du cervelet (Pascual-Leone et al., 1993).

⁵⁷ Vu la petite taille de leur échantillon, cet effet était seulement révélé en analysant les tailles d'effet (*d* de Cohen).

Très récemment, une équipe de chercheurs de l'Université de Gand ont comparé l'activité cérébrale de 17 enfants TAC avec celle de 17 enfants de contrôle lors d'une tâche de temps de réaction visuo-motrice (Debrabant, Gheysen, Caeyenberghs, Van Waelvelde, & Vingerhoets, 2013). Dans cette tâche, le degré de prédictibilité temporelle des stimuli visuels (images apparaissant au centre de l'écran) est manipulé en alternant entre des blocs « prédictibles » (c'est-à-dire où l'intervalle inter-stimuli est constant) *versus* des blocs « non-prédictibles » (c'est-à-dire où l'intervalle inter-stimuli est variable). Les sujets ne sont pas informés de cette manipulation ; ils doivent simplement répondre le plus rapidement possible à l'apparition des stimuli. Les données comportementales et d'activation cérébrale indiquent que les enfants TAC ne bénéficient pas de la régularité temporelle des stimuli visuels⁵⁸. Par ailleurs, les enfants TAC présentent globalement une moindre activation que les contrôles au niveau du cortex préfrontal dorsolatéral droit, du cervelet postérieur gauche et du réseau temporo-pariétal droit. Ces résultats suggèrent un défaut dans la mise en place des processus de timing chez les enfants TAC.

L'hypothèse d'un déficit de timing dans le TAC n'est toutefois pas confirmée par toutes les recherches sur ce thème (pour une revue, voir Wilson & Butson, 2005). Par exemple, une étude montre que la variabilité des réponses tend à disparaître avec l'âge chez les enfants TAC, ce qui évoque plutôt un retard développemental au niveau du contrôle temporel (Greene & Williams, 1993).

Noyaux gris centraux

Malgré l'importance des noyaux gris centraux (et notamment, le striatum) dans le contrôle moteur et la mémoire procédurale, il n'existe actuellement aucune donnée en imagerie explorant l'intégrité de cette structure dans le trouble de l'acquisition de la coordination. Toutefois, quelques études comportementales vont dans le sens d'un dysfonctionnement des noyaux gris centraux dans le TAC. Elles incluent les recherches portant sur le contrôle de la force du mouvement (par exemple, Smits-

⁵⁸Dans ce type d'épreuve, on s'attend à ce que les sujets répondent plus rapidement aux stimuli prédictibles en comparaison aux stimuli non-prédictibles, cet effet dépendant de la mise en place des processus de « timing ».

Engelsman, Westenberg, & Duysens, 2008) et sur l'apprentissage de séquences motrices (voir infra).

Lundy-Ekman et ses collaborateurs (1991) démontrent la présence d'un déficit de contrôle de la force parmi un sous-groupe d'enfants TAC qui présentent des signes neurologiques mineurs qui témoignent d'une atteinte des noyaux gris centraux⁵⁹. Notons qu'un autre sous-groupe d'enfants est également identifié comme présentant des signes d'une atteinte cérébelleuse⁶⁰ ; les enfants issus de ce sous-groupe manifestent des difficultés dans les tâches évaluant le timing. Ces résultats suggèrent l'existence d'au moins deux sous-groupes d'enfants atteints de TAC, discernables au niveau de leurs atteintes cérébrales. Ceci permettrait d'expliquer, pour une part, les manifestations souvent hétérogènes de ce trouble.

Cortex pariétal

Querne et ses collaborateurs (2008) mettent en évidence une diminution de la connectivité, particulièrement marquée dans l'hémisphère droit, entre le striatum et le cortex pariétal chez des enfants TAC, durant la réalisation d'une tâche d'inhibition motrice de type go-no go. Celle-ci semble compensée par une activation accrue des régions antérieures impliquant les cortex cingulaire antérieur, frontal moyen et pariétal inférieur. Une expérience ultérieure met en évidence une moindre activation du cortex pariétal supérieur et inférieur gauche chez 12 enfants TAC, en comparaison aux contrôles, durant la réalisation d'une tâche simple de poursuite de cibles en mouvement (Kashiwagi, Iwaki, Narumi, Tamai, & Suzuki, 2009).

Toutefois, des résultats contrastés ont été mis en évidence par Zwicker et al. (2010). Pour rappel, cette étude montrait une plus grande activation, notamment dans la région pariétale, chez les enfants TAC comparativement aux enfants de contrôle durant la réalisation d'une tâche de dessin. Ces résultats divergents peuvent sans doute être expliqués, au moins en partie, par la nature différente des deux tâches motrices. Ainsi, dans la première étude, la tâche utilisée se révèle être très simple ; la performance de

⁵⁹ Ceux-ci étaient détectés via un examen clinique. Les signes considérés sont les mouvements anormaux (syncinésies, athétoses et chorées).

⁶⁰ Les signes neurologiques mineurs évoquant une atteinte cérébelleuse comprennent une incapacité à produire la bonne distance pour les mouvements (dysmétrie) et à effectuer des mouvements alternatifs rapides (dysdiadochokinesia), ainsi qu'un tremblement lors de la réalisation de mouvements.

tous les enfants atteignent rapidement un plateau, et ce avant que commence l'exploration sur le plan cérébral. Par contre, dans la seconde étude, conduite par Zwicker et al., la tâche se révèle être beaucoup plus complexe ; les enfants sont testés dans la phase précoce du processus d'apprentissage. Zwicker et al. (2011) mettent d'ailleurs en évidence que, lorsque cette tâche a préalablement fait l'objet d'un apprentissage, une sous-activation du réseau impliquant notamment les régions pariétales est alors mise en évidence comparativement aux enfants de contrôle.

En résumé, les études en imagerie fonctionnelle sont encore très limitées dans le TAC. Ces résultats préliminaires, bien qu'ils doivent être considérés avec prudence, suggèrent des anomalies cérébrales touchant notamment les régions cérébelleuses et pariétales durant la réalisation d'une activité motrice. Concernant les structures sous-corticales des noyaux gris centraux, les données en imagerie sont encore inexistantes.

Données comportementales

Apprentissage de séquences perceptivo-motrices

A ce jour, seules trois études ont exploré l'hypothèse d'un déficit de la mémoire procédurale à l'aide du paradigme de temps de réaction sériel. Dans une première expérience, Wilson, Maruff et Lum (2003) comparent 10 enfants TAC et 10 enfants de contrôle, âgés de 8 à 12 ans, à une tâche TRS composée de quatre blocs d'essais correspondant à la présentation d'une séquence répétée de 10 éléments (1-3-4-2-3-1-4-2-1-4), puis d'un bloc d'essais aléatoires. Les deux groupes d'enfants montrent des performances équivalentes pour l'apprentissage spécifique de la séquence ; les enfants TAC étaient toutefois plus lents que les enfants de contrôle tout au long de la tâche.

L'interprétation de ces résultats est cependant problématique pour toute une série de faiblesses sur le plan méthodologique (dont le petit nombre d'enfants testés). On peut également regretter l'absence d'un nouveau bloc d'essais correspondant à la séquence qui suit le bloc d'essais aléatoires afin de contrôler d'éventuels effets de fatigue, ainsi que l'absence d'équivalence structurelle entre le bloc aléatoire et la séquence répétée.

Gheysen et al. (2011) répliquent cette étude en incluant un plus grand nombre de sujets (18 enfants TAC et 20 enfants de contrôle). Ils utilisent le même matériel, mais

en y apportant quelques adaptations afin de pallier les faiblesses méthodologiques. Par exemple, ils contrôlent la fréquence d'occurrence des stimuli dans le bloc aléatoire et insèrent un bloc d'apprentissage supplémentaire (administré après le bloc aléatoire). Les résultats obtenus mettent en évidence un déficit spécifique de l'apprentissage de la séquence chez les enfants TAC. Pourtant, lorsqu'il leur est demandé de reproduire la séquence d'apprentissage lors d'une tâche de génération, les enfants démontrent une certaine connaissance de la séquence d'apprentissage qui est identique à celle des enfants de contrôle. Selon les auteurs, ce n'est pas l'acquisition de la séquence qui pose problème chez les enfants TAC, mais plutôt la planification motrice de la séquence à réaliser.

A la lecture de ces résultats, une question demeure : les difficultés présentées par les enfants TAC à la tâche de TRS reflètent-elles bien un déficit dans l'apprentissage procédural en tant que tel, ou sont-elles liées à la modalité de réponse (qui, en raison des troubles moteurs présentés par ces enfants, pourrait interférer avec l'apprentissage). Dans cette étude, un boîtier était utilisé comme modalité de réponse. Comme nous l'avons déjà abordé dans le chapitre précédent, pour effectuer correctement une tâche de TRS, le sujet doit montrer une certaine aisance dans l'utilisation du boîtier réponse ; il doit être également capable d'associer facilement les touches à leur position correspondante sur l'écran. Pour des enfants présentant des troubles moteurs, ce type de dispositif peut représenter une réelle difficulté et ainsi affecter l'apprentissage spécifique de la séquence. Dans cette perspective, l'utilisation d'un écran tactile comme modalité de réponse pourrait représenter une alternative intéressante pour tester l'hypothèse d'un déficit de la mémoire procédurale chez les enfants TAC (les avantages de cette modalité de réponse ont été présentés page 54).

Enfin, une étude conduite par Mayor-Dubois, Zesiger, Van der Linden et Roulet-Perez (2012) compare la performance de 18 enfants dysphasiques (âgés de 8 à 14 ans), dont la dysphasie est associée ou non à un TAC, à celle de 65 sujets de contrôle. Comme dans l'étude menée par Meulemans et al. (1998), la tâche de TRS consistait à présenter une séquence de 10 éléments, en alternance avec des stimuli apparaissant de manière pseudo-aléatoire. Leurs résultats montrent que les enfants dysphasiques sans trouble moteur associé, bien que plus lents que les enfants contrôles, parviennent

à apprendre la séquence. En revanche, les enfants dysphasiques avec troubles moteurs associés⁶¹ (c'est-à-dire, 8 enfants sur 18) ne montrent aucun apprentissage spécifique de la séquence. Ces résultats suggèrent que les difficultés d'apprentissage procédural pourraient être davantage liées à la présence de troubles moteurs.

En résumé, la variabilité des résultats obtenus dans ces trois études qui utilisent la tâche de TRS peut renvoyer à différents facteurs (notamment, des différences méthodologiques concernant la séquence, mais également des différences en termes de sévérité des troubles de la coordination dans le groupe d'enfants TAC⁶²). Quoi qu'il en soit, à la lecture de ces trois études, il paraît totalement prématuré de confirmer l'hypothèse d'un déficit de mémoire procédurale chez les enfants TAC. Toutefois, les résultats des deux dernières études nous invitent à envisager de façon sérieuse cette hypothèse, comme une des causes probables à l'origine de ce trouble.

Adaptation perceptivo-motrice

Différents travaux se sont attachés à étudier les capacités d'adaptation perceptivo-motrice d'enfants atteints de TAC. Tout comme dans les études développementales chez l'enfant « normal », aucune référence n'est faite à la notion d'apprentissage procédural. L'intérêt se porte ici sur la manière dont les représentations internes des mouvements se modifient à la suite d'une déviation introduite dans le champ visuel. Le cervelet est particulièrement impliqué dans ce type de tâche ; sa fonction est de corriger les erreurs de mouvements afin de faire face aux perturbations de l'environnement⁶³. L'objectif de ces études est de tester l'hypothèse d'un dysfonctionnement cérébelleux dans le trouble de l'acquisition de la coordination. La mise en évidence d'un tel déficit dans ce groupe apporterait un argument en faveur de l'hypothèse défendue par Nicolson et Fawcett (2007).

⁶¹ A noter que la détection des enfants TAC était basée uniquement sur les critères du DSM-IV-TR. Aucune tâche objectivant les troubles moteurs n'était incluse.

⁶² Par exemple, l'étude de Wilson et al. (2003) prend comme score seuil à la M-ABC le percentile 15 pour sélectionner les enfants TAC, alors que dans l'étude de Gheysen et al. (2011), le score seuil était fixé au P5.

⁶³ Le cervelet agit en tant que « signal d'erreurs » ; il détecte et corrige les erreurs, permettant ainsi la formation d'un nouveau modèle interne contenant les nouvelles représentations perceptivo-motrices pertinentes pour l'action à réaliser.

Kagerer, Bo, Contreras-Vidal et Clark (2004) rapportent les résultats d'une étude dans laquelle ils comparent 7 enfants, âgés de 6 à 8 ans, ayant un TAC et 7 enfants de contrôle sur une tâche informatisée d'adaptation perceptivo-motrice. Les participants devaient tracer un trait, à l'aide d'un stylet, entre une position centrale affichée à l'écran et un point bleu situé à une distance de 10 centimètres de la cible de départ dans une condition où la scène visuelle faisait l'objet d'un retournement de 45°. Les cibles apparaissent de façon aléatoire, dans une parmi quatre localisations à l'intérieur d'un cercle virtuel autour du point central. Les résultats montrent que les erreurs de mouvement durant les essais d'apprentissage ne sont pas détectées par les enfants TAC qui, en conséquence, ne corrigent pas leur mouvement pour les essais subséquents. En d'autres termes, les enfants atteints de TAC ne s'aperçoivent pas que la relation entre les mouvements de la main et les feedback visuels a été modifiée.

Les auteurs conduisent une seconde étude (Kagerer, Contreras-Vidal, Bo, & Clark, 2006), incluant cette fois un plus grand nombre d'enfants dans l'échantillon des enfants TAC. L'ambition des chercheurs était de comparer la performance des enfants entre une perturbation visuelle abrupte *versus* progressive. Les résultats montrent que les enfants TAC ont du mal à détecter les petits signaux d'erreurs (c'est-à-dire lorsque la perturbation était introduite de façon progressive). Par contre, ils ne présentaient pas de difficultés d'adaptation lorsque la perturbation visuelle était introduite de façon directe. Ces résultats confortent l'idée d'une dysfonction cérébelleuse dans le TAC.

Plusieurs recherches, dont l'objectif est de mettre en évidence un déficit de la fonction cérébelleuse parmi les enfants TAC, utilisent la tâche d'adaptation prismatique. Par exemple, Cantin, Polatajko, Thach et Jaglal (2007) explorent les capacités de 9 enfants TAC et de 9 enfants de contrôle dans une tâche qui consiste à porter des lunettes prismatiques (qui dévient le champ visuel de 15° vers la gauche) durant la réalisation d'une épreuve de lancers de balles⁶⁴. La comparaison des performances des deux groupes d'enfants révèle que les enfants atteints de TAC sont en général moins précis dans leurs lancers que les enfants de contrôle, et que leurs performances sont également plus variables. Les analyses individuelles suggèrent également qu'un déficit

⁶⁴ Les enfants qui portent ces lunettes doivent ajuster leurs mouvements afin que les balles atteignent effectivement les cibles.

cérébelleux est présent chez 6 des 9 enfants TAC testés, qui montrent plus de difficultés d'adaptation que les autres enfants.

Dans une étude assez similaire, Brookes et al. (2007) comparent la performance de 14 participants atteints de dyslexie et de 14 enfants TAC avec celles de 12 enfants de contrôle sur une tâche d'adaptation prismatique. Parmi les enfants diagnostiqués TAC, 6 présentaient également une dyslexie. Pour les auteurs, ceci offrait l'opportunité de tester l'effet de la comorbidité sur ce type de tâche. Les résultats montrent qu'en général, les enfants dyslexiques, TAC, et TAC+dyslexiques sont plus lents pour s'adapter à la perturbation visuelle que les enfants de contrôle. Toutefois, les analyses individuelles révèlent que 71% des dyslexiques, 100% des TAC et 83,3% du groupe présentant le double diagnostic ont un déficit d'adaptation. Cet article fournit une preuve assez convaincante d'un déficit de la fonction cérébelleuse dans le trouble de l'acquisition de la coordination.

En résumé, malgré des différences inter-individuelles, les difficultés d'adaptation motrice retrouvées chez un certain nombre d'enfants TAC fournissent des preuves supplémentaires en faveur de l'hypothèse, formulée par Nicolson et Fawcett (2007), d'un déficit de mémoire procédurale dans ce trouble. Il convient toutefois de rester prudent dans la mesure où aucune étude dans le TAC n'a actuellement exploré les capacités d'automatisation d'une nouvelle habileté procédurale au travers de ce paradigme d'adaptation motrice.

Autres tâches d'apprentissage moteur

Plusieurs études ont exploré les bénéfices d'un entraînement répété sur la performance motrice d'enfants TAC. Revie et Larkin (1993) testent un programme d'intervention qui consiste à entraîner 24 enfants TAC, âgés de 5 à 9 ans, à certaines activités sportives (par exemple, réceptionner une balle au volleyball) durant 8 sessions et 4 semaines. La comparaison du pré- et du post-test met en évidence des gains importants dans la performance motrice pour tous les enfants.

Marchiori, Wall et Bedingfiel (1987) ont évalué l'acquisition d'une habileté motrice complexe, à savoir le « tir frappé » au hockey chez 2 enfants TAC (âgés de 7 et 8 ans) appariés à 2 enfants de contrôle. Les analyses ne montrent aucune amélioration

significative de la performance des enfants TAC, même après une pratique intensive composée de 1200 essais répartis sur 6 semaines.

L'apprentissage procédural moteur a également été exploré dans le TAC à l'aide de la tâche de poursuite rotative⁶⁵ auprès de 19 enfants diagnostiqués TAC et de 19 enfants de contrôle (Lord & Hulme, 1988). Les résultats mettent en évidence une grande variabilité inter-individuelle parmi les enfants du groupe clinique : 10 d'entre eux présentent un pattern d'apprentissage similaire au groupe contrôle, les 9 autres n'auraient par contre pas réussi à développer les programmes moteurs nécessaires pour accomplir la tâche efficacement. Les auteurs évoquent, notamment pour certains enfants, une difficulté à contrôler les feedback visuels reçus lors de la tâche, les empêchant ainsi de développer des séquences programmées de mouvements.

Missiuna (1994) évalue l'apprentissage et le transfert d'une habileté motrice auprès de 24 enfants TAC et de 24 enfants de contrôle. La tâche consistait à manipuler le pointeur d'une souris d'ordinateur dans le but d'atteindre des cibles situées sur l'écran d'ordinateur. Durant la phase d'entraînement, les cibles étaient positionnées à 2,5 cm du point central ; l'amplitude du mouvement était donc toujours la même. Différentes tâches de transfert sont ensuite introduites afin d'examiner si la nouvelle habileté motrice, une fois apprise, peut être généralisée à une tâche différente. Le *premier niveau de transfert* implique simplement un changement au niveau de l'apparence visuelle (la cible utilisée durant la phase d'apprentissage est remplacée par une autre cible). Ce niveau de transfert requiert de l'enfant d'appliquer le même schéma moteur que celui qui a été entraîné. Le *second niveau de transfert* implique de modifier l'amplitude du mouvement puisque les cibles sont situées à 5 cm du point central ; la direction du mouvement et la taille des cibles restent identiques à la tâche d'apprentissage. Les résultats de cette étude montrent des taux d'apprentissage et de transfert identiques entre les deux groupes. Toutefois, les enfants TAC présentent des temps de réalisation majorés par rapport à ceux du groupe contrôle. Cette lenteur se retrouve aussi bien dans la phase d'acquisition que dans la phase de transfert, ce qui indique que les différences entre les deux groupes ne s'estompent pas avec la pratique répétée de la tâche. Les auteurs suggèrent que ce ralentissement peut être

⁶⁵ Une description de cette tâche est présentée page 64.

stratégique, dans le but à la fois d'améliorer la précision de leurs mouvements et de répondre à un besoin constant de se référer aux feedback visuels. Sur le plan qualitatif, les auteurs notent que les enfants TAC ont eu besoin de plus d'encouragement pour réaliser les essais d'entraînement, alors que leur concentration était par ailleurs très bonne.

En résumé, ces études, qui portent sur une variété de tâches motrices, conduisent une nouvelle fois à des résultats assez contrastés. Si un certain bénéfice d'un entraînement répété aux activités motrices peut être révélé dans certaines conditions, il semble qu'il existe d'une part une grande variabilité inter-individuelle, et d'autre part une lenteur persistante parmi les enfants TAC.

Automatisation : sensibilité à la double tâche

Une approche intéressante, permettant de tester le degré d'automatisation d'une habileté motrice, est le paradigme de double tâche. Dans une étude récente, Tsai, Pan, Cherng et Wu (2009) investiguent l'hypothèse d'un déficit d'automatisation à l'aide du paradigme de double tâche⁶⁶ auprès de 39 enfants TAC appariés à 39 enfants de contrôle, âgés de 9 et 10 ans. La tâche principale consistait en une épreuve d'équilibre sur une planche sur laquelle les enfants devaient rester le plus stables possible. Une des 4 tâches secondaires était administrée simultanément à la tâche principale : [1] une tâche de décomptage par trois, [2] une tâche de réaction à choix auditivo-verbal (les enfants devaient dire si les sons entendus étaient aigus ou graves), [3] une tâche de réaction à choix auditivo-motrice (appuyer sur le bouton réponse droit si le son entendu est aigu, sur le bouton gauche si le son est grave), et [4] une tâche de mémoire auditivo-verbale (apprentissage d'une liste de 15 mots). Les résultats indiquent un niveau de performance équivalent entre les deux groupes lorsque la tâche d'équilibre était réalisée seule. De plus, en condition de double tâche, aucun effet de groupe n'est mis en évidence lors de la comparaison des performances aux différentes tâches secondaires. Par contre, à l'exception de la tâche de réaction à choix auditivo-motrice (qui était la seule à nécessiter une réponse motrice et qui n'a occasionné aucun effet d'interférence sur la tâche principale), l'introduction de la tâche interférente

⁶⁶ Voir page 32 pour une description de ce paradigme.

affecte la performance motrice dans les deux groupes, mais l'effet d'interférence était plus marqué parmi les enfants TAC.

Le paradigme de double tâche a également été utilisé dans le but d'explorer l'impact d'une tâche interférente sur l'activité de la marche chez 14 enfants TAC et 28 enfants de contrôle (Cherng, Liang, Chen, & Chen, 2009). La volonté des chercheurs était de tester l'effet de différentes tâches interférentes (motrices *versus* cognitives ; difficiles *versus* faciles) sur la performance motrice. La tâche concurrente motrice consiste à transporter un plateau vide (condition facile) ou un plateau sur lequel sont disposées 7 billes (condition difficile), et ce tout en marchant. La tâche concurrente cognitive est une tâche de répétition de séries de chiffres dans l'ordre (à l'endroit, condition facile) ou à l'envers (condition difficile). Les résultats ne montrent aucune différence entre les groupes lorsque la marche était réalisée seule (sur un certain nombre de paramètres tels que la vitesse). Par contre, en condition de double tâche, la marche des enfants TAC était plus affectée par la tâche concurrente que celle des enfants de contrôle, lorsque celle-ci était difficile. Toutefois, ce pattern de résultats était seulement révélé avec la tâche motrice concurrente (tenir un plateau). La tâche cognitive affecte également la marche, mais le coût de cette interférence ne diffère pas entre les deux groupes. Les auteurs mettent en perspective la ressemblance entre les performances obtenues par les enfants TAC avec celles obtenues auprès de patients parkinsoniens dans une expérience assez similaire (voir, Bond & Morris, 2000). Selon les auteurs, cette ressemblance n'est pas surprenante si l'on considère les sous-bassements cérébraux sous-tendant ces deux troubles (à savoir, l'atteinte du cervelet et des noyaux gris centraux).

En résumé, le paradigme de double tâche a encore été très peu utilisé. Pourtant, il représente une approche intéressante pour évaluer le degré d'automatisation d'une habileté. Une diminution significative des performances à la tâche principale, résultant de l'introduction d'une tâche secondaire, peut refléter un déficit d'automatisation de la tâche principale. Au contraire, si celle-ci ne requiert pas un contrôle attentionnel particulier, elle sera moins affectée par la réalisation simultanée d'une tâche secondaire.

CONCLUSION

Si le concept de « trouble de l'acquisition de la coordination » a fait l'objet d'un consensus sur le plan international, il n'en reste pas moins que l'étiologie, les caractéristiques et la définition même de ce trouble restent encore à l'heure actuelle extrêmement incertaines.

Sur base d'observations cliniques et d'études empiriques, la question de l'existence de différents sous-types dans le TAC a été envisagée. Toutefois, on peut s'interroger sur la pertinence de cette démarche, qui consiste à répartir les enfants TAC dans des sous-groupes que l'on voudrait « homogènes ». En effet, plusieurs données mettent en évidence l'aspect dynamique des troubles développementaux ; les symptômes présentés à un moment donné peuvent évoluer avec l'avancement en âge. On peut alors regretter qu'aucune étude longitudinale ne soit encore disponible pour tester, avec du recul, la pertinence de ces sous-catégories. Dans ce contexte et en l'absence d'arguments empiriques forts concernant l'existence de sous-types de TAC, nous n'avons pas distingué les différents profils de troubles présentés par ces enfants. Par ailleurs, la majorité des travaux que nous avons décrits précédemment ne distinguent pas différents sous-types.

Concernant la question de l'étiologie du TAC, un large panel de déficits susceptibles d'être à l'origine du trouble a été proposé. Actuellement, les théories les plus influentes sont celles qui ont trait à la théorie du traitement de l'information et à celle d'un défaut de modélisation interne. Dans une toute autre perspective, certains auteurs ont également proposé de considérer le TAC comme un trouble de l'apprentissage moteur (Ahonen et al., 2004). Cette approche propose une base théorique plus solide à la compréhension des troubles d'apprentissage moteur présentés par les enfants TAC. Ce modèle fait également écho à l'hypothèse d'un déficit de mémoire procédurale, proposée initialement par Nicolson et Fawcett (2007). L'idée d'un déficit de mémoire procédurale sous-tendant les difficultés motrices des enfants TAC semble prometteuse puisqu'elle permettrait de rendre compte d'un large pattern de difficultés, notamment celles qui ont trait à l'apprentissage moteur. En effet, d'un point de vue clinique, on constate que ces enfants sont dans l'impossibilité, au fil des apprentissages, d'automatiser leurs gestes qui restent toujours sous contrôle attentionnel. De plus,

comme nous l'avons vu tout au long de ce chapitre, différentes voies de recherche fournissent des données convergentes en faveur de cette hypothèse. Paradoxalement, très peu d'études ont évalué les capacités d'acquisition de nouvelles habiletés chez l'enfant TAC. De telles recherches s'avèrent pourtant nécessaires à notre compréhension de l'étiologie du TAC. Par ailleurs, d'un point de vue clinique, une meilleure connaissance des troubles en cause permettrait de proposer des prises en charge adaptées et efficaces et ainsi de limiter les conséquences néfastes sur le développement de ces enfants.

PARTIE EXPERIMENTALE

OBJECTIFS DES ETUDES

L'objectif général des recherches qui composent cette thèse est d'explorer la mémoire procédurale au cours du développement normal et dans le trouble de l'acquisition de la coordination, en prêtant une attention particulière à l'apprentissage d'habiletés perceptivo-motrices.

Comme nous l'avons vu dans la partie théorique de ce travail, très peu d'études abordent la question du développement de la mémoire procédurale. Ce constat est surprenant quand on sait que les capacités de mémoire procédurale sous-tendent de nombreux apprentissages chez l'enfant.

La littérature chez l'adulte révèle que l'acquisition d'une habileté procédurale est un phénomène dynamique, composé de différentes étapes qualitativement distinctes. Dans la conception la plus classique de l'apprentissage procédural, on considère qu'il existe un basculement progressif, au fil d'une pratique répétée, d'une connaissance déclarative vers une connaissance procédurale, automatisée et difficilement verbalisable (Anderson, 1982; Fitts & Posner, 1967). Selon cette approche de type « top-down », les mécanismes cognitifs de haut niveau jouent un rôle important durant les phases initiales du processus d'acquisition.

Dans une perspective développementale, cette conception théorique apparaît toutefois peu compatible avec l'idée d'une émergence précoce de la mémoire procédurale, dans la mesure où les processus cognitifs explicites censés intervenir dans les premiers stades de l'apprentissage procédural se développent tardivement durant l'enfance. En d'autres termes, si les processus explicites (et plus particulièrement les fonctions exécutives) sont essentiels à l'apprentissage procédural, comment de jeunes enfants pourraient-ils apprendre de nouvelles habiletés, sachant que leurs mécanismes explicites sont peu efficaces ? Les nombreuses habiletés procédurales maîtrisées durant l'enfance donnent à penser que d'autres voies d'apprentissage permettent également ce type d'acquisition. Dans cette perspective, plusieurs auteurs proposent une vision alternative à l'approche « top-down » en démontrant que l'apprentissage

d'une nouvelle habileté, même complexe, peut être, dans certaines circonstances, sous-tendue par des mécanismes implicites dès le début de l'apprentissage (voir par exemple, Karmiloff-Smith, 1992; Sun et al., 2001). A cet égard, quelques travaux ont confirmé que les formes implicites d'apprentissage étaient présentes très tôt durant l'enfance (par exemple, Clohessy et al., 2001). Toutefois, la question de leur développement reste sujette à discussion. Par ailleurs, les situations expérimentales classiques d'apprentissage procédural (comme par exemple la tâche de dessin en miroir) ont été peu explorées dans une perspective développementale. Dès lors, de nombreuses questions restent à ce jour en suspens, notamment concernant la nature des processus cognitifs impliqués durant les premières phases de l'apprentissage chez les plus jeunes enfants, pour qui les processus explicites sont en plein développement.

Dans une perspective neuropsychologique, différentes voies de recherche suggèrent que les structures cérébrales impliquées dans l'acquisition et l'automatisation de nouvelles habiletés (à savoir, les noyaux gris centraux et le cervelet) sont particulièrement vulnérables à des pathologies développementales. A cet égard, les travaux menés par Nicolson et Fawcett (1990) auprès de sujets dyslexiques ont fourni les premiers arguments en faveur de l'hypothèse d'un déficit de la mémoire procédurale dans les troubles du développement chez l'enfant. Dans le trouble de l'acquisition de la coordination (TAC), cette idée semble prometteuse dans la mesure où elle permettrait de rendre compte d'un large éventail de difficultés, notamment celles qui ont trait à l'apprentissage moteur. En effet, d'un point de vue clinique, on observe que ces enfants sont souvent dans l'impossibilité, au fil des apprentissages, d'automatiser leurs gestes. Différentes voies de recherche fournissent également des données convergentes en faveur de cette hypothèse suggérant, par exemple, que le cervelet pourrait être impliqué dans la pathogenèse du TAC. Et pourtant, très peu d'études ont exploré les capacités d'acquisition d'une nouvelle habileté chez l'enfant TAC.

Ce travail de thèse tente d'apporter des éléments de réponse à certains des questionnements évoqués ci-dessus. Il s'inscrit dans une perspective tant *développementale* que *neuropsychologique*, et s'organise en deux parties.

L'objectif principal de la première partie est de contribuer à une meilleure compréhension du développement de la mémoire procédurale. Nos travaux de recherche se concentrent sur deux catégories de tâches : l'adaptation perceptivo-motrice (par exemple, le dessin en miroir) et l'apprentissage d'une séquence motrice (par exemple, le temps de réaction sériel - TRS), nous donnant ainsi l'opportunité d'explorer différents aspects de la mémoire procédurale. En effet, bien que ces deux types de tâches conduisent à une connaissance procédurale, automatisée, qui s'exprime dans l'activité du sujet et qui est difficilement verbalisable, un certain nombre de caractéristiques les distinguent et notamment, celles relatives aux mécanismes impliqués durant l'apprentissage. Ainsi, le dessin en miroir est classiquement considéré comme « explicite » car les participants « savent » dès le début qu'ils doivent acquérir une nouvelle habileté (l'apprentissage n'est pas incident, comme c'est le cas dans le TRS). Une particularité de cette tâche d'adaptation motrice, contrairement à la tâche de TRS, est également qu'elle nécessite de modifier une association sur-apprise entre la vision et le comportement moteur ; la personne doit ainsi aller à l'encontre de ses automatismes pour réaliser la tâche. Cette composante « exécutive » a été confirmée par plusieurs études menées auprès d'adultes. Dans la tâche de TRS, telle qu'elle est administrée de façon traditionnelle, le participant n'est pas informé de la présence d'une séquence, ce qui favorise un apprentissage de type implicite. Ces deux paradigmes d'apprentissage nous permettent ainsi d'investiguer le développement des formes implicites d'apprentissage procédural (Etude 1), mais également, au travers de la tâche d'adaptation motrice, d'explorer le rôle joué par les mécanismes explicites durant l'acquisition de l'habileté à différentes étapes du développement cognitif de l'enfant (Etude 2 et 3).

L'objectif principal de la deuxième partie est de tester l'hypothèse d'un déficit des capacités de mémoire procédurale dans le trouble de l'acquisition de la coordination. A l'heure actuelle, très peu d'études ont évalué les capacités d'apprentissage de nouvelles habiletés chez l'enfant TAC. De plus, les données disponibles conduisent à des résultats contrastés. Dans cette optique, nous avons évalué les capacités de mémoire procédurale d'enfants diagnostiqués TAC à l'aide de la tâche de TRS (Etude 4) et de la tâche d'adaptation perceptivo-motrice (Etude 5). Enfin, et de façon plus spécifique, nous avons investigué les capacités d'automatisation d'une habileté de

dessin en miroir à l'aide du paradigme de double tâche chez des enfants TAC (Etude 6).

Un aspect important de ce travail a consisté à mettre au point des tâches d'apprentissage procédural adaptées aux jeunes enfants ainsi qu'aux enfants présentant des troubles moteurs. Les épreuves actuellement disponibles sont, en général, peu attractives pour les enfants. La nature du matériel, mais également le fait que l'enfant doit réaliser la même tâche durant une période prolongée, participent au caractère fastidieux voire parfois rebutant de ce type de tâche. Dans ces conditions, l'enfant peut se décourager au fil des essais, ou même refuser de poursuivre la séance. De la même manière, proposer une tâche purement motrice aux enfants TAC impliquait évidemment de les confronter à leur difficulté principale, ce qui pouvait éveiller en eux des réactions négatives. Afin de garder les enfants motivés tout au long des séances, nous avons adapté quatre tâches d'apprentissage procédural en tentant de les rendre les plus attractives possible. Les versions adaptées des tâches, telles qu'elles sont présentées dans les Etudes 1, 2, 3 et 5, sont le résultat d'intenses réflexions nourries au travers de plusieurs études préliminaires qui ne seront pas présentées dans ce présent document. Dans la partie « Discussion », nous aborderons néanmoins l'intérêt, mais aussi les limites, de ces épreuves expérimentales.

L'**Etude 1** vise à explorer le développement des formes implicites d'apprentissage procédural. Pour ce faire, nous comparons, avec la tâche de TRS, l'apprentissage d'une séquence de 8 *versus* 12 éléments auprès de 128 participants répartis en 4 groupes d'âge (4 ans, 7 ans, 10 ans et un groupe de jeunes adultes). Nous voulions ainsi déterminer [1] si une influence de l'âge pouvait être observée dans l'apprentissage spécifique de la séquence, et [2] si cet apprentissage pouvait varier en fonction de certaines caractéristiques de la séquence, telles que sa longueur. Etant donné que l'utilisation classique du clavier d'ordinateur (ainsi qu'une condition de réponse bi-manuelle) peut représenter une réelle difficulté pour de jeunes enfants, nous utilisons un écran tactile comme mode de réponse. De plus, plutôt qu'une présentation linéaire des stimuli sur l'écran d'ordinateur, une présentation en carré est utilisée pour mieux séparer les cibles spatialement.

Dans l'**Etude 2**, nous administrons une version informatisée de la tâche d'adaptation perceptivo-motrice (qui consiste à manipuler une souris d'ordinateur en position inversée) à 76 participants répartis en trois groupes d'âge (7 ans, 10 ans et un groupe de jeunes adultes). L'objectif de cette recherche est d'explorer le développement des capacités d'apprentissage procédural chez l'enfant et, conjointement, d'analyser l'implication des processus exécutifs au cours de la première phase (par opposition aux stades ultérieurs) du processus d'acquisition qui permet *in fine* l'automatisation de la nouvelle habileté. Si l'on considère que l'apprentissage procédural dans ce type de tâche dépend initialement de la contribution de mécanismes cognitifs de haut niveau, des différences liées à l'âge devraient être observées sur le plan de l'apprentissage, particulièrement entre l'âge de 7 et de 10 ans, car les fonctions exécutives connaissent un développement important durant cette période (voir par exemple, Brocki & Bohlin, 2004).

Dans l'**Etude 3**, nous administrons une version plus classique de la tâche d'adaptation motrice (le dessin en miroir). L'objectif de cette recherche est d'explorer le rôle joué par les mécanismes explicites durant les premières phases de l'apprentissage procédural chez 76 enfants âgés de 7 et de 10 ans. Bien que les théories traditionnelles considèrent que la première étape de l'apprentissage est principalement soutenue par les processus explicites, nous avons émis l'hypothèse que, chez les jeunes enfants, les processus implicites prédominent durant les phases initiales de l'acquisition. Pour ce faire, nous testons, à l'aide du paradigme de double tâche, l'effet d'une tâche secondaire auditive (dite « interférente »), introduite en début d'apprentissage, sur la performance à la tâche de dessin en miroir. Nous prédisons que, chez les enfants de 10 ans, l'interférence entre les deux tâches pourrait être élevée puisque les mécanismes sous-tendant les premiers essais d'apprentissage reposent sur des stratégies explicites (coûteuses en ressources attentionnelles). A l'inverse, l'interférence entre les deux tâches pourrait être faible pour les enfants de 7 ans dans la mesure où leur performance à la tâche procédurale est principalement sous-tendue par des mécanismes implicites, peu (ou pas) coûteux en ressources attentionnelles.

L'**Etude 4** a pour but de tester l'hypothèse d'un déficit de l'apprentissage procédural dans le trouble de l'acquisition de la coordination à l'aide de la tâche de temps de

réaction sériel. Les trois études réalisées précédemment avec le TRS font état de résultats contrastés (Gheysen et al., 2011; Mayor-Dubois et al., 2012; Wilson et al., 2003) et soulèvent une question particulière : les difficultés présentées par les enfants TAC à la tâche de TRS reflètent-elles un déficit dans l'apprentissage procédural en tant que tel, ou sont-elles liées à la modalité de réponse (qui, en raison des troubles moteurs présentés par ces enfants, pourrait interférer avec l'apprentissage) ? Dans ce contexte, nous évaluons 34 enfants âgés de 6 à 12 ans avec ou sans TAC sur une variante de la tâche de temps de réaction sériel, identique à l'Etude 1. Sur la base de l'hypothèse du déficit en mémoire procédurale, nous prédisons que même avec l'écran tactile comme mode de réponse, les enfants atteints de TAC devraient présenter des difficultés dans l'apprentissage spécifique de la séquence par rapport aux sujets de contrôle. En revanche, un niveau de performance similaire entre les enfants TAC et leurs pairs remettrait en cause cette hypothèse initialement formulée par Nicolson et Fawcett (2007).

Dans l'**Etude 5**, nous administrons à ces mêmes 34 enfants une tâche d'adaptation perceptivo-motrice (une version simplifiée de la tâche de souris inversée utilisée dans l'Etude 2). Un certain nombre d'études suggèrent en effet que les enfants TAC présentent des difficultés dans les tâches d'adaptation motrice (voir par exemple, Brookes et al., 2007). Toutefois, aucune de ces recherches ne nous a renseignée sur les capacités d'apprentissage procédural en tant que telles, c'est-à-dire sur les différentes étapes d'acquisition de l'habileté. Dans ce contexte, nous comparons la performance des enfants TAC à celles des enfants de contrôle durant l'acquisition de la tâche de souris inversée. Plus précisément, nous testons [1] l'amélioration rapide généralement observée au cours de la première session d'entraînement, [2] les capacités de consolidation (c'est-à-dire l'amélioration spontanée de la performance entre deux séances d'entraînement), [3] la stabilisation des performances durant la seconde session, et [4] la capacité de généralisation, c'est-à-dire la capacité à appliquer l'habileté apprise à une situation différente de celle qui a été entraînée. Nous prédisons que si les enfants TAC ont un déficit de mémoire procédurale, nous devrions trouver des différences de performance entre nos deux groupes d'enfants dans au moins une de ces étapes.

L'**Etude 6** est conduite afin d'évaluer plus spécifiquement les capacités d'automatisation d'une habileté de dessin en miroir auprès de 15 enfants TAC (comparés à 15 enfants de contrôle). Pour ce faire, nous utilisons le paradigme de double tâche. Les épreuves expérimentales ainsi que la procédure de passation étaient identiques à celles de l'Etude 3, si ce n'est que la tâche interférente n'a été introduite qu'à la fin de la phase d'entraînement. Notre hypothèse est que la performance des enfants TAC à la tâche principale de dessin en miroir pourrait se dégrader au moment de l'introduction de la tâche interférente, alors que celle des enfants de contrôle resterait stable en condition de double tâche.

DEVELOPMENTAL INVARIANCE IN IMPLICIT SEQUENCE LEARNING

Caroline Lejeune, Audrey Gabriel, Xavier Schmitz, and Thierry Meulemans

Soumis pour publication dans *Developmental Psychology*

INTRODUCTION

The term "implicit learning" usually refers to forms of learning that occur incidentally (e.g., Cleeremans & Dienes, 2008; Seger, 1994). It relates to situations in which a subject's behavior becomes sensitive to certain regularities in the environment (Cleeremans & Dienes, 2008; Perruchet & Nicolas, 1998). It is also often said to be "unconscious," in the sense that the subject is not conscious of learning something, and because—according to some authors—the resulting knowledge is inaccessible to conscious awareness and/or difficult to express (Seger, 1994).

One of the most common methods for assessing implicit learning abilities is the serial reaction time (SRT) task (Nissen & Bullemer, 1987), which focuses specifically on the ability to implicitly detect the sequential structure of a repeated sequence of stimuli, in the absence of any explicit knowledge of the information that is to be learned. Typically, participants have to react as fast as possible to stimuli appearing in one of four locations on a computer screen by pressing spatially corresponding keys on the keyboard. Participants are not told that the stream of stimuli corresponds to a repeating sequence (or even that they are in a learning situation). Usually, learning is demonstrated by reaction time improvement across trials, and more specifically by the difference in response latency between a final block that includes the repeating sequence and a transfer block (including a new sequence of stimuli or pseudo-random stimuli)—an advantage in performance on the former is assumed to reflect sequence-specific learning.

From a developmental perspective, although it is widely acknowledged that implicit learning abilities are present very early in infancy (Clohessy et al., 2001; Haith & Mccarty, 1990), the question of whether they vary with age across development has not yet been definitively answered. To our knowledge, six published experiments have investigated developmental changes across childhood using the SRT paradigm. In the first study, Meulemans et al. (1998) compared the implicit learning performance of two groups of children (aged 6 and 10 years) and a group of adults on a 10-element sequence embedded in a learning block which alternated presentations of the repeating sequence with pseudo-random sequences, a procedure that was used in order to prevent (or minimize) the formation of explicit knowledge of the repeating sequence.

The results showed similar learning rates in all three age groups (6-year-olds, 10-year-olds and adults). Two other SRT studies using a more classical procedure, consisting in presenting several consecutive learning blocks containing the repeating sequence followed by one transfer block composed of pseudo-random stimuli, presented results which also suggested that implicit learning is age-insensitive in school-age children (Karatekin et al., 2007; Lum et al., 2009).

On the other hand, the studies of Thomas and co-workers (Thomas et al., 2004; Thomas & Nelson, 2001) have offered contradictory results, suggesting that sequence learning on an SRT task can improve with age. Thomas and Nelson compared three groups of children aged 4, 7, and 10 years on an SRT task including 5 blocks of 100 trials including a 10-item sequence (in Blocks 1 and 4, the stimuli occurred in a random sequence). Although the measures based on reaction times showed similar sequence-specific learning in the three groups, further analyses based on anticipatory responses (i.e., any responses during the sequence trials that occurred earlier than the fastest response during the random trials) revealed developmental changes (i.e., 10-year-old children produced a greater number of anticipatory responses). The authors interpreted this as reflecting the development of explicit learning mechanisms with age. Subsequently, Thomas et al. (2004) conducted a functional brain imaging study comparing a group of 10 children (aged 7 to 11 years) with a group of 10 adults on an SRT task adapted from Meulemans et al. (1998), using comparable learning sequences. The imaging data highlighted age-related differences between children and adults in the recruitment of cortical and subcortical areas. At the same time, the behavioral data showed that adults outperformed children, showing a larger learning effect on the task. Thomas et al. interpreted this pattern of results to suggest that implicit learning may improve with age, contrary to the widespread hypothesis of age invariance.

Finally, De Guise and Lassonde (2001) found no learning effect at all in children aged less than 12 years on a bimanual SRT task, whereas all participants of 6-19 years of age learned the 10-element sequence under unimanual conditions. They suggested that the lack of learning effects in the bimanual condition could reflect the immaturity of the corpus callosum in younger children. However, other studies using similar designs

have not confirmed these results (e.g., Karatekin et al., 2007; Meulemans et al., 1998). These results should thus be interpreted with caution, particularly considering the relatively small sample size (10 children per group).

The apparent contradictions between the findings of these different studies could be linked, at least partially, to methodological factors, including the statistical structure and degree of statistical constraint on the sequences employed, but also response-to-stimulus intervals (RSI) and, possibly, the response mode. Some of these factors can influence learning (for instance, favoring the intervention of explicit processes). For instance, the sequence ('1324123424') used by Thomas and Nelson (2001) has a high degree of statistical constraint: i.e., some transitions occur more frequently than others (the trigram '241' appears twice as often as other trigrams). Stadler (1992) suggested that this factor might induce the development of explicit knowledge. On the other hand, Thomas et al. (2004) used a greater RSI (750 ms instead of 250 ms as in the study of Meulemans et al., 1998). It has also been argued that increasing the length of the RSI may influence the involvement of explicit processes in SRT tasks (e.g., Destrebecqz et al., 2005).

Previous studies in children have used "ambiguous" 10-element long sequences in which each stimulus position can be followed by two different possible locations (A. Cohen et al., 1990). Such sequences have several characteristics that can facilitate learning. Some locations and transitions occur more often than others. In the sequence used in Thomas and Nelson's (2001) study (see above), location 4 is presented 3 times in each cycle, while location 1 is only presented twice. In addition, the probability of some transitions is .64 (e.g., 24), for others it is .33 (e.g., 23), and for some it is 0 (e.g., 21). Consequently, the children may have learned that some locations or first-order transitions occurred more often than others (Deroost et al., 2010). Ideally, these differences in item and first-order transition frequency should also be found in random trials (Curran, 1997). Although Meulemans et al. (1998) and Thomas et al. (2004) controlled for redundancy, only Karatekin et al. (2007) controlled for first-order transition frequency as well; in other developmental studies, no information is provided on the way the random trials were generated. Thus, in these studies, it is difficult to determine whether the information the children learned was complex (second order) or quite

simple (first order). Patterns in first-order transitions within a sequence could lead to the emergence of explicit knowledge, which can facilitate learning (Orban et al., 2008). The involvement of such explicit processes during learning, might be expected to lead to an age effect, with older children and adults performing better than young children.

Studies conducted in adults have preferentially used 12-element second-order conditional (SOC) sequences (e.g., Destrebecqz & Cleeremans, 2001; Stefaniak et al., 2008), because they contain no predictive first-order information (i.e., all first-order transitions are presented equally often). In other words, it is possible to predict an upcoming location, but only on the basis of the two stimuli that precede it. The learning effect can then be assessed by comparing the learned sequence with a transfer sequence that is similar to the training sequence on a number of features, but that has different conditional second-order relations. Any interference effect on the transfer block thus must be related to the learning of the training sequence's complex structure. There are relatively few published studies using 12-element SOC sequences in children with developmental disorders (Deroost et al., 2010; Gabriel et al., 2013). The results of control children on this task show that children between the ages of 7 and 15 years can learn such sequences. It remains to be determined whether preschool-age children are able to learn such sequences as well as older children and adults do, and whether such SOC sequences can be learned at a similar rate to shorter SOC sequences at various ages.

From these studies on implicit sequence learning, it seems that these abilities are present early in childhood, but the question of whether they evolve in the course of development remains open. The purpose of the present study was thus to use sequences in which stimulus locations can only be predicted on the basis of second-order associations (which are known to prevent, or at least minimize, the formation of explicit knowledge of the repeating sequence) to obtain clearer evidence on possible change in implicit sequence learning capacities over the course of development. We sought to test the hypothesis of age invariance in implicit learning by comparing the learning of 8- and 12-element SOC sequences in four age groups (4 years, 7 years, 10 years, and young adults) using the serial reaction time paradigm. The advantage of sequences with 8 or 12, rather than 10 elements, is that each of the four locations can

appear the same number of times. Consequently the possibility of an influence of simple frequency information can be ruled out. If, as suggested by Thomas et al. (2004), implicit learning improves with age, we expect to find performance differences between age groups (for instance, 4-year-olds might have more difficulty acquiring the sequence than older children and adults), an effect that should be more pronounced when the sequence is longer. On the other hand, if we obtain no age effect with sequences of either length, this would offer additional evidence in favor of the age invariance hypothesis. The possibility that some explicit knowledge could emerge during learning, however, cannot be ruled out. In order to control for the involvement of explicit knowledge, we included a post-task measurement of sequence awareness.

In order to avoid potential difficulties with the administration of the SRT task to 4-year-old children (see for instance Thomas & Nelson, 2001), we used an adaptation of the SRT task that reduces (or even eliminates) the cognitive and perceptuomotor constraints associated with the classical SRT task. In this version, devised by Gabriel et al. (2012; see also Lejeune, Catale, Willems, & Meulemans, 2013), the standard keyboard is replaced by a touch screen. In this way, subjects can simply use their dominant hand to touch the target directly on the screen. In addition, a quadrant presentation was used: with this arrangement, the locations can more easily be separated into large spatial domains (Thomas & Nelson, 2001).

METHODS

Participants

In total, 128 participants, 32 from each of four age groups, were assessed: four-year-olds ($M_{\text{age}} = 4$ years 5 months [4;5], range = 4;01–4;10, 18 girls and 14 boys), seven-year-olds ($M_{\text{age}} = 7;5$, range = 10;00–10;11, 17 girls and 15 boys), 10-year-olds ($M_{\text{age}} = 10;6$, range = 10;00–10;11, 16 girls and 16 boys), and a comparison group of young adults ($M_{\text{age}} = 25;5$, range = 20;5–30;6, 19 women and 13 men). No participant had a history of neurological or psychiatric problems or learning disabilities as completed by an anamnestic questionnaire. All participants had normal or corrected-to-normal vision, and performed above the fifth percentile on Raven's Progressive Matrices (Raven, 1960; Raven, Court, & Raven, 1998).

Materials and procedure

Serial Reaction Time (SRT) task

The experiment included 8 blocks of a four-choice RT task. Each block consisted of an 8- or 12-element SOC sequence (8A = 34121432 or 8B= 42132431; 12A = 341243142132 or 12B = 342312143241) repeated eight times. In each condition, half of the participants were trained on the first sequence (8A) for the first 6 blocks and the 8th block, with the second sequence presented on the 7th block (8B); the pattern for the other half of the participants was the opposite. On each trial, a stimulus (a cartoon character) appeared in one of four possible locations (one of the four corner windows in a scene). As suggested by Thomas and Nelson (2001), the screen was divided into four large spatial domains, and each stimulus in the sequence was located in one quadrant (rather than the linear presentation classically used in SRT tasks). More specifically, the scene featured two windows on the second floor (upper left and right) and two windows on the ground floor (lower left and right). The horizontal and vertical distances between the edges of the windows were 25 and 14.5 centimeters, respectively.

Stimulus presentation and recording of data were performed using E-Prime software (version 1.1). Participants were presented with the modified version of the SRT task developed by Gabriel et al. (2012), where the standard keyboard was replaced with a touch screen. The touch screen was placed on top of the laptop screen, and was the same size as the monitor (15 inches). The laptop screen was open at a 180° angle to the keyboard in order to ensure the most comfortable position possible for the subject. The average eye-screen distance was 70 cm.

To keep the subjects (particularly young children) motivated and focused on the task, the test was presented as a game in which the child had to catch a character to liberate his/her friends. In order to fulfill their mission, the participants had to catch each character as quickly and accurately as possible. At the beginning of the SRT task, the participants were free to spontaneously choose one arm according to their hand preference. Once they had chosen their hand, they were not allowed to use the other hand at any point during the task. The task was a continuous choice reaction time

procedure. The character was removed once a target had been chosen (the character was removed on error trials as well), or when 4000 ms had elapsed. No feedback was given following errors. The next stimulus appeared after a 250-ms response-stimulus interval. The SRT task was administered in a single session. The participants were given a break after each experimental block. They were not informed of the presence of a sequence.

After the SRT task, participants' explicit awareness of the sequence was tested. Subjects were told that the locations of the characters followed a pattern, and they were administered a free generation task in which they were asked to freely generate a series of 34 trials (for the 8-element sequence) or 50 trials (for 12-element sequence), reproducing the repeating sequence as much as possible. On this task, each time the child subject touched the screen there was a beep informing them that the answer had been recorded. The number of correct trigrams was identified as the generation score. Since the generated sequences were 34 trials or 50 trials) long, the maximum number of correct trigrams was 32 (or 48).

RESULTS

Serial Reaction Time Task

Accuracy

Mean accuracy rates were very high in all age groups (4 yrs: 90.91%; 7 yrs: 97.44%; 10 yrs: 99.18%; adults: 99.80%). Age group comparisons showed that only 4-year-old children made fewer correct responses than the other age groups, but as these accuracy rates are too high to draw meaningful conclusions, they were not further analyzed.

Reaction time

All other analyses were carried out on median reaction times (RTs) per block. RTs were log-transformed in order to increase homogeneity of variance. All effects were assessed for significance at the $p = .05$ level.

To determine decrease in RTs over sequenced blocks, we performed an ANOVA with block (6 levels: Blocks 1 to 6) as a within-subjects variable and age group (4 levels: 4,

7, 10 years, and adults) and sequences (2 levels: 8-element *versus* 12-element) as between-subjects factors. This analysis showed a significant main effect of age group, $F(3, 120) = 216.4$, $p < .001$, $\eta^2_p = .84$, indicating that RTs were higher for younger participants than older (see Figure 6). A main effect of sequence and a significant Sequence x Age group interaction were also obtained, $F(1, 120) = 9.8$, $p = .002$, $\eta^2_p = .07$ and $F(3, 120) = 5.8$, $p < .001$, $\eta^2_p = .13$, respectively, indicating that for some age groups (7- and 10-year-olds), RTs were higher for the 12-element sequence than for the 8-element sequence. A significant main effect of block showed that RTs decreased progressively with successive blocks, $F(5, 600) = 84.6$, $p < .001$, $\eta^2_p = .41$. In addition, a significant Sequence x Block interaction was observed, $F(5, 600) = 3.5$, $p = .004$, $\eta^2_p = .03$, showing that the RT increase between the learning block and the transfer block was more pronounced for the 8-element sequence than for the 12-element sequence in all age groups. The other interactions did not reach significance ($p > .10$).

In order to estimate sequence-specific learning effects, we analyzed the difference in RTs between the learning sequence Blocks 6 and 8 and the transfer block (7). The introduction of the last learning block after the transfer block was used to ensure that the RT increase between Blocks 6 and 7 was not due to a fatigue effect. We performed an ANOVA with block (Blocks 6 and 8 *versus* Block 7) as a repeated measure and age group (4 levels) and sequence (2 levels) as between-subjects variables. This analysis showed a significant effect of block, $F(2, 240) = 83.0$, $p < .001$, $\eta^2_p = .41$, with Blocks 6 and 8 processed faster than Block 7 (the transfer block). This difference was similar for all age groups, as shown by the non-significant Block x Age interaction, $F(6, 240) = 1.7$, $p = .12$, $\eta^2_p = .04$. A significant Block x Sequence interaction was found, $F(2, 240) = 15.3$, $p < .001$, $\eta^2_p = .11$, indicating that the RT difference between the learning blocks and the transfer block was more pronounced for the 8-element sequence than for the 12-element sequence, for all age groups, suggesting that the shorter sequence was better learned than the longer one.

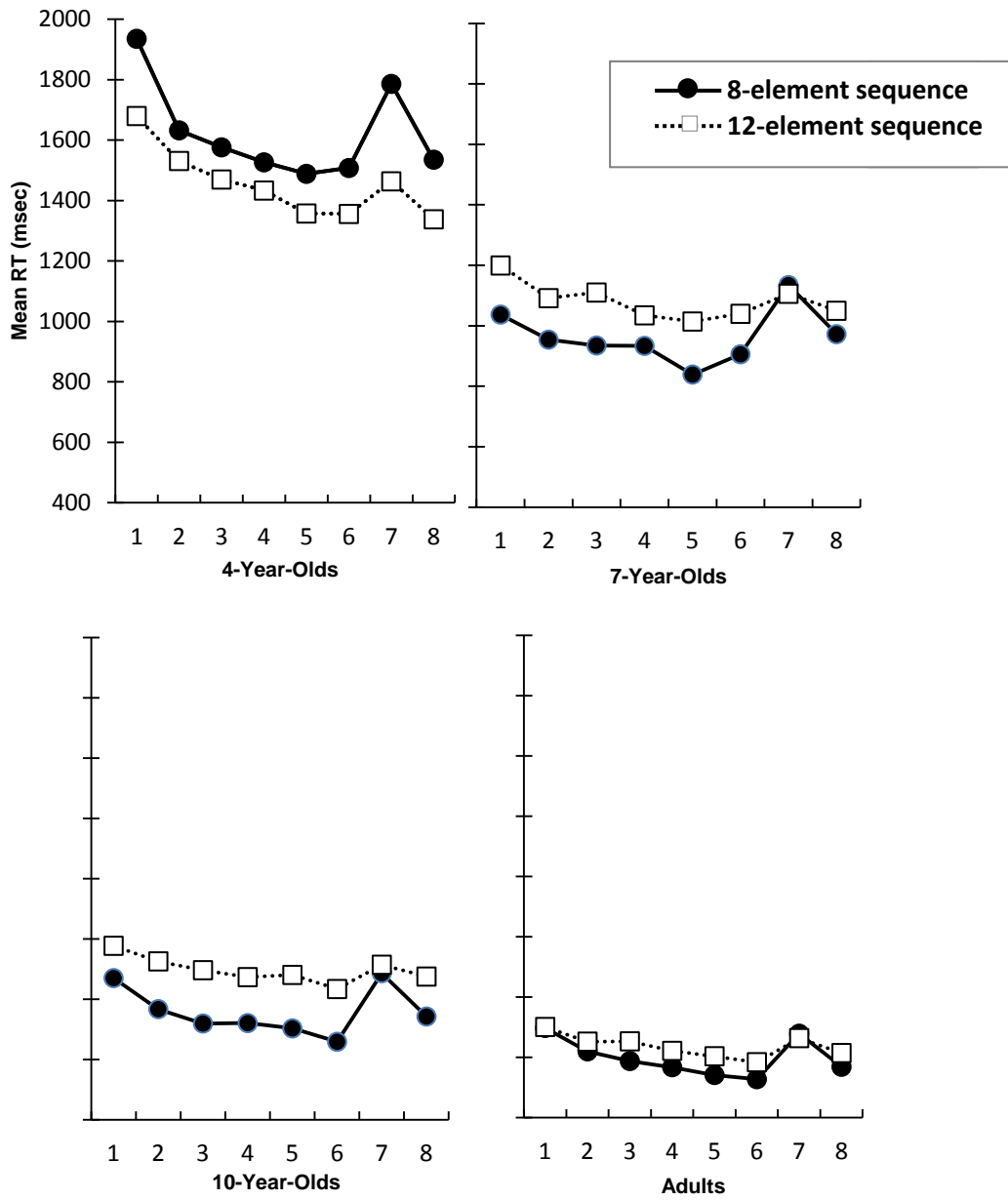


Figure 6. Mean median reaction time (RT) per block by age group (4, 7, and 10 years old and adults) as a function of sequence length (8- and 12-element SOC sequences).

However, it might be argued that, in the case of the 8-element sequence, the comparison between the learning block and the transfer block is problematic because sequences 8A and 8B differed in half of their transitions (i.e., 1 was followed by 2 and 4 in sequence A, and by 3 and 4 in sequence B). In this context, simple knowledge (e.g., 4 is never followed by 2 in the learning sequence) might be sufficient to explain at least part of the participants' performance on the 8-element sequence, in contrast with the 12-element sequence, in which all bigrams are presented the same number of times in both the learning and transfer blocks. In light of this issue, we performed a further analysis, excluding the RTs in the transfer block in the 8-element condition corresponding to transitions that differed between the two sequences. This new analysis offers a measure of second-order learning, without incorporating first-order learning. As previously, we performed an ANOVA with block (Blocks 6 and 8 *versus* Block 7, the transfer block) as a repeated measure and age group and sequence length as between-subjects variables. The results were similar to those obtained above. Again, the analyses revealed that, in all age groups, the learning effect was more pronounced with the 8-element sequence than with the 12-element sequence. This advantage could no longer be attributed to the learning of the first-order transitions present in the 8-element sequence.

Explicit sequence awareness

To measure generation performance, the number of trigrams consistent with the sequence was computed for all age groups. An explicit awareness score was determined for each participant, based on the number of correct trigrams divided by the maximum possible number of correct triplets (32 for the 8-element, and 48 for the 12-element sequence). The results are illustrated in Figure 7. To check for differences in explicit awareness, a 4 x 2 ANOVA with age group (4 levels) and sequence (8- *versus* 12-element sequence) as between-subjects factors was carried out on the explicit awareness score. This analysis showed that explicit awareness did not differ between age groups, $F(3,120) = 1.40$, $p = .24$, $\eta^2_p = .03$, nor between the two sequence learning tasks, $F(1,120) = 2.81$, $p = .10$, $\eta^2_p = .02$. This indicates that the level of sequence awareness in the four age groups and for the two sequences was comparable.

Finally, there was no significant correlation between the generation score and the SRT learning index (calculated according to the equation $[\text{Block 7} - \text{Block 6}] / [\text{Block 6} + \text{Block 7}]$, Cherry & Stadler, 1995; Thomas & Nelson, 2001) for any groups (all p s > .05). Thus, although some groups' performance differed significantly from chance, these differences in explicit sequence awareness between groups do not appear to have influenced the pattern of results.

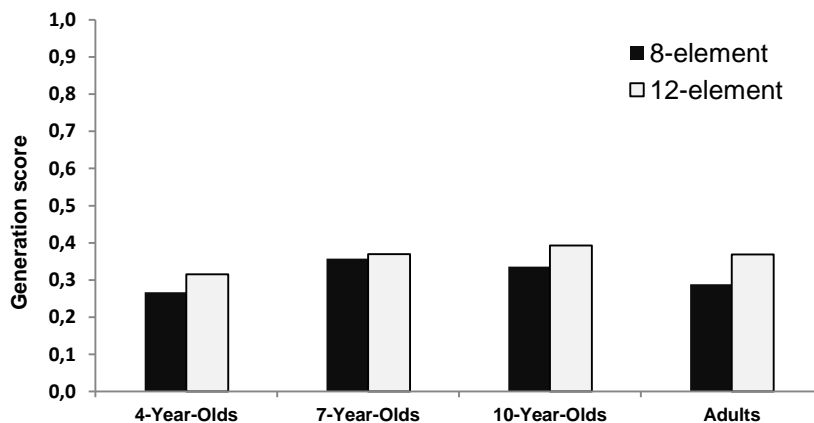


Figure 7. Explicit awareness score by age group (4, 7, & 10 years old and adults) as a function of sequence structure (8- versus 12-element).

DISCUSSION

In this study, we examined implicit learning abilities in children aged 4, 7, and 10 years old, as well as in young adults, using a serial reaction time task, with a focus on the comparison of second-order conditional sequences of two different lengths (8- and 12-element). All previous developmental studies have used 10-element long sequences, but we chose to compare 8- and 12-element SOC sequences because with these sequence lengths, in contrast with a 10-element sequence, each of four locations can appear with identical frequency within the sequence. Consequently, in both sequences (8 and 12), the transitions could only be predicted by learning second-order associations (Gabriel et al., 2013). Moreover, the classical keyboard was replaced by a touch screen in order to prevent the difficulties that the classical task may present for young children,

and the task was presented in the form of a more attractive, computer game-like task. The results showed significant and similar learning effects in 4-, 7-, and 10-year-old children, as well as adults. The learning effect was more pronounced for the 8-element sequence than for the 12-element sequence for all age groups, suggesting that the shorter sequence was better learned than the longer one. In addition, the degree of explicit sequence awareness was comparable between age groups and sequence lengths.

Thus, our data, showing that children between the age of 4 and 10 years are able to learn 8- and 12-element SOC sequences as well as adults do, provide further support for the hypothesis that implicit learning abilities are invariant across development. Previous studies on the effect of age on implicit learning have yielded contrasting results, with some authors observing no age-related difference in sequence learning in children (e.g., Meulemans et al., 1998), and others reporting performance improvements with increasing age (e.g., Thomas et al., 2004). These contrasting results are probably due to methodological differences, and more specifically to the type of sequence used, which may influence the type of learning processes involved and the kind of knowledge (explicit *versus* implicit) acquired. In a deterministic sequence, the structure of the sequence, particularly the type of transitions between elements that carry predictive information (i.e., first- or second-order) can influence whether learning is primarily implicit or explicit (Orban et al., 2008). Thus, the presence of predictive regularities in first-order transitions might facilitate the emergence of explicit learning, whereas a sequence where only second-order transitions allow prediction is more likely to lead to predominantly or exclusively implicit sequence learning. The apparent contradictions between studies could thus be explained by the fact that, in some studies, older children and adults were able to develop explicit knowledge of the sequence. In our study, we chose to use SOC sequences, which are known to limit the involvement of explicit learning processes. The absence of any difference in learning between the four age groups confirms the implicit nature of the learning process. Indeed, the fact that 4-year-old children and adults learned at a similar rate suggests strongly that our participants did not acquire explicit knowledge of the sequence (the involvement of explicit mechanisms would have been expected to offer an advantage to adults over 4-year-old children). In addition, the comparable low

level of sequence awareness in all groups reinforces the idea that learning in the four age groups was primarily governed by implicit mechanisms.

Other interesting results include the demonstration that children can learn a 12-item-long SOC sequence—and not only 10-item sequences as shown in previous studies — and the observation of a sequence length effect in all groups, in favor of the 8-element sequence. This result, showing that a shorter sequence is easier to learn than a longer one, is consistent with findings reported in the adult literature (D. V. Howard & Howard, 1989; Pascual-Leone et al., 1993), supporting the idea that implicit learning is capacity-limited. Stadler and Neely (1997), however, contested this view, arguing that the results of these two previous studies are subject to question because the effect of sequence length could have been confounded with the effect of sequence structure. In order to further investigate these two effects on sequence implicit learning, they conducted three experiments in which they manipulated the two factors independently. Overall, their results suggested that the structure of a sequence has more impact on learning than its length. In our experiment too, it was possible for the effect of sequence length on implicit learning to be confounded with the effect of the sequence structure. In the 8- and 12-element second-order conditional sequences that we used, each sequence element appears with the same probability, and an upcoming location can be predicted based on the two elements that precede it (for instance, in the sequence “34121432”, location 3 would be followed by 2 only when preceded by 4). However, in the 12-element sequence, each location was followed once each by all three of the other elements, whereas in the 8-element sequence, each location was followed by only two of the three other possible locations (for instance, 3 is followed by 4 or 2, but never 1). Therefore, with the 8-element sequence, learning of simple information (i.e., the non-occurrence of some transitions) could have contributed to RT improvement. Consequently, the comparison between learning and transfer blocks might be problematic because, inevitably, some transitions presented in the transfer sequence were not present in the learning sequence. However, even after excluding the transitions in the transfer block that were not common to the two 8-element sequences, learning of the 8-element sequence remained more pronounced than learning of the 12-element sequence in all age groups. This advantage thus cannot be attributed to the learning of first-order transition knowledge about the 8-element sequence. In fact, while

our results indicate that the 8-element SOC sequence was easier to learn than the 12-element SOC sequence and rule out the involvement of first-order transition knowledge or explicit learning in this difference, they do not offer clear information on the factors that are in fact involved.

Finally, our study is the first to directly compare children, as young as 4 years old with a group of adults using the same adapted touch screen as a response mode. The value of the touch screen is that it requires less precision and visual-motor coordination, minimizing disadvantages due to immature sensorimotor coordination capacities (Gabriel et al., 2012; Lejeune, Catale, Willems, et al., 2013). Moreover, in the standard SRT task both hands (dominant and non-dominant) are used, whereas in this modified version of the SRT task responses are made only with the dominant hand. The results of De Guise and Lassonde (2001) suggest that a bimanual response condition may impede sequence learning in young children, possibly due to the immaturity of the corpus callosum. Indeed, in the view of some authors, the cognitive and motor demands of the SRT task may put children at a disadvantage. Thomas and Nelson (2001) chose to adapt stimulus presentation (using quadrant presentation rather than linear presentation) and the response mode (rather than the classical keyboard, they used a larger response box), but they only did so for 4-year-old children. Children aged 7 and 10 years responded with a smaller response box, and stimuli were presented to them in a linear array. In addition, subjects could choose any finger combination to make their responses (for instance, younger children used the index finger, whereas older children used separate fingers for each location). Thus, direct group comparisons are more difficult to interpret. Moreover, their results showed that, while the 4-year-olds' performance was quite accurate, eleven 4-year-old children (28%) failed to show the typical pattern of improved performance. In our sample, the percentage of non-learners among 4-year-olds was 16% (5 children out of 32), suggesting that the touch screen may indeed be better adapted for children of this age. The use of the same response mode for all groups also makes comparison of results from different ages more straightforward.

In conclusion, the key result of this study is the absence of any age-related difference in implicit sequence learning. Indeed, our results show that 4-year-old children can learn

8- and 12-element SOC sequences as well as adults do. This result strengthens the idea that implicit learning capacities reach maturity early in development, as suggested by some previous studies (Karatekin et al., 2007; Meulemans et al., 1998). Moreover, this study provides supporting evidence of the utility of a touch screen as a response mode for studying implicit sequence learning in preschool and school-age children. Finally, an advantage for the 8-trial sequence appears in comparison with the 12-element sequence, in all age groups. However, further developmental studies are needed to better understand the relative influence of sequence length and sequence structure in performance on this type of task.

AGE-RELATED DIFFERENCES IN PERCEPTUOMOTOR PROCEDURAL LEARNING IN CHILDREN

Caroline Lejeune, Corinne Catale, Xavier Schmitz, Etienne Quertemont, and Thierry Meulemans

Journal of Experimental Child Psychology (2013), 116, 157-168

INTRODUCTION

From an early age, children acquire many kinds of perceptuomotor skills; for example, they can learn how to eat with cutlery, manipulate a computer mouse, tie shoelaces, or use a variety of tools at school. Through repeated practice, these skills gradually become automated and can be performed without awareness or fatigue. They represent what one calls “routines” – that is, procedural skills. Procedural learning refers to the process in which new perceptuomotor, perceptual, or cognitive skills are acquired through long and repetitive training (N. J. Cohen & Squire, 1980; Willingham, 1998). Considering the early maturity of the brain structures underlying procedural learning, it is generally acknowledged that this system is present early in childhood, and that, undoubtedly, it plays an important role in child development.

The process of learning a procedural skill is generally considered to proceed in a series of distinct learning phases, with cognitive resources playing an important role during the initial step of learning. Through repeated practice, the skill becomes progressively more automatic and the involvement of controlled cognitive functions progressively dwindles. This conception is formalized in the adaptive control of thought (ACT) model (Anderson, 1982), wherein knowledge is first stored in a declarative form and then converted into procedural knowledge. According to this top-down approach to learning, this transformation occurs in three stages: the first—the “cognitive” stage—requires a large amount of cognitive (e.g., working memory) resources; during the second, “associative” stage, the involvement of cognitive functions is progressively reduced; and the last phase—the “autonomous” stage—is characterized by automation and no longer requires the involvement of explicit processes. Brain imaging studies in adults have confirmed the existence of distinct learning phases, showing that different brain structures are active at the different stages in motor skill learning (Doyon & Benali, 2005; Hikosaka et al., 1999). The early stages of learning recruit the basal ganglia and the cerebellum; prefrontal, parietal, and limbic areas; and motor cortical regions. When consolidation has occurred, performance becomes automatic, and the circuits involved depend on the type of motor skill acquired (Doyon & Benali, 2005). The ACT model has received experimental support from a number of studies on perceptuomotor procedural learning which have highlighted the role of explicit cognitive processes in the first learning phase. More specifically, several studies have demonstrated that some

procedural learning tasks require the intervention of nonprocedural functions, in particular executive functions. First, Kennedy, Partridge, and Raz (2008) showed that the effects of age on perceptuomotor skill acquisition (such as mirror tracing) may be mediated by the deterioration of cognitive resources (notably working memory) during aging. Second, Brosseau, Potvin, and Rouleau (2007) argued that the age-related difficulties observed in the learning of the mirror tracing task mainly reflect the involvement of executive functions (inhibitory control). Third, Schmidtke, Manner, Kaufmann, and Schmolck (2002) found that patients with prefrontal lesions experience some difficulties with adaptation in the initial phases of learning on the Pursuit Rotor task, confirming the involvement of the prefrontal cortex in the first phase of motor learning. To summarize, results obtained with adults and elderly people support the proposal that explicit cognitive processes play a key role in the first phase of procedural learning. These studies have also demonstrated age-related differences in at least some procedural learning tasks where executive functions seem to play a key role.

While the top-down approach to procedural learning (i.e., performance in the first learning stages is sustained by explicit, high-level mechanisms) has received the most attention, some researchers have also proposed a bottom-up approach to skill learning which postulates that explicit declarative knowledge is not necessarily involved in procedural skill learning, and that the knowledge acquired could be stored in an implicit mode from the beginning of learning (Karmiloff-Smith, 1992; Liao & Masters, 2001; Sun et al., 2001). Karmiloff-Smith (1992), for example, proposed the representational redescription model (RR model) which suggests that children shift progressively during development from a procedural learning mode (involving the formation of procedural knowledge) to a more declarative learning mode (leading to the formation of declarative knowledge). This view suggests the possibility that procedural learning in young children (whose explicit learning mechanisms have not yet fully developed) might work differently than the ACT model suggests, without necessarily involving the intervention of explicit cognitive resources (e.g., working memory) during the first phase of learning.

The developmental literature on procedural learning is sparse: little is known about the mechanisms underlying procedural skill acquisition in children and their development or variation in developmental time. Most studies on the developmental trajectory of

perceptuomotor procedural learning in children have used the serial reaction time paradigm (e.g., Karatekin et al., 2007; Thomas et al., 2004), which focuses specifically on the ability to detect the sequential structure in some repeated sequence of stimuli implicitly, without any explicit knowledge of the information that is to be learned. This situation differs from the perceptuomotor adaptation paradigm used in many studies on procedural learning, in which there is no repeated sequential information to be learned. One perceptuomotor adaptation task that is widely used in adult studies (and particularly in neuropsychological studies) is the mirror tracing task, which requires participants to trace a shape with a pencil while seeing the action of their hand reflected in a mirror. In this task, which resembles real life procedural learning situations in many respects, participants have to adapt their motor behavior continuously in response to distortions of visual feedback; contrary to the serial reaction time task, the learning situation can be qualified as explicit, in that participants know from the outset that they have to improve their performance. Moreover, they have to inhibit an overlearned association between vision and motor behavior. In contrast with the (supposedly) “implicit” nature of the learning processes involved in the serial reaction time paradigm, it is generally acknowledged in the adult literature that explicit cognitive processes play an important role in many skill learning situations, at least in the initial phases of learning (e.g. Brosseau et al., 2007). Surprisingly, only a few developmental studies have investigated procedural learning using this kind of paradigm in children. For instance, Ferrel-Chapus et al. (2002) explored the adaptive capacities of children aged between 5 and 11 years and a group of adults. Participants had to draw a figure without being able to see their hand, and with a view of the scene that was rotated by 180°. Their findings showed age-related differences in initial performance: the youngest children (5 and 7 years) had more difficulties than 9- and 11-year-olds and adults; they were more affected by the visual distortion. Interestingly, in spite of this initial difference in performance, children and adults learned at similar rates. These data raise the question of the cognitive mechanisms underlying perceptuomotor skill acquisition in children, whose explicit mechanisms are still developing.

In this context, the main purposes of this study were twofold. (1) To determine whether procedural learning performance improves with age by comparing groups of 7-year-old children, 10-year-old children, and adults on a new perceptuomotor adaptation task; for

this purpose, the transfer of the ability to a different and more complex task, as well as its long-term retention were also explored. (2) To investigate the role played by executive functions during the first and last stages of the acquisition of the skill in these three groups. These age groups were chosen because they correspond to key steps in the development of executive functions (Brocki & Bohlin, 2004; Jonkman, 2006; Luciana & Nelson, 1998; Schleepen & Jonkman, 2010; Welsh, Pennington, & Groisser, 1991). According to Anderson's (1982) ACT model, and given the involvement of executive functions during the first phase of a perceptuomotor adaptation task (e.g., Brosseau et al., 2007), we expected to find executive functions to be involved mainly at the beginning of learning. Moreover, we hypothesized that executive resources would less contribute to the learning process in 7-year-olds (because these functions are less developed in these children) than in 10-year-olds and adults, and that 7-year-olds might then have more difficulty acquiring the procedural skill (for instance, their performance could be slower or less accurate during the first trials). Considering that some complex executive skills can develop further during adolescence (e.g., Huizinga et al., 2006; Schleepen & Jonkman, 2010), we also predicted that a difference might be found between 10-year-old children and adults.

METHOD

Participants

A total of 76 subjects divided into three age groups were assessed: a first group of 22 7-year-olds ($M_{age} = 7$ years 4 months; age range = 7;00 to 7;11; 10 females and 12 males); a second group of 31 10-year-olds ($M_{age} = 10$ years 4 months; age range = 10;00 to 10;11; 14 females and 17 males); and a comparison group of 23 adults ($M_{age} = 25$ years 8 months; age range = 19;10 to 29;10; 13 females and 10 males).

No participants had any history of neurological or psychiatric problems or learning disabilities. All participants had normal or corrected-to-normal vision; they were all right-handed and had already used a computer mouse. All participants performed above the fifth percentile on Raven's Progressive Matrices (Raven, 1960; Raven et al., 1998).

Measures

Perceptuomotor procedural learning task

The Mouse Task consisted in a new and original computerized test. The equipment was composed of a laptop computer (15-inch screen and 1024 × 768-pixel resolution) and an optical wireless mouse (Trust MI-4150x). The task was programmed using the Toolbook software (version 9.0).

Participants were told that they would be playing a computer game with characters from the movie *Ice Age*. In order to maintain a sufficient motivation level, especially in young children, the task was designed to be attractive and to resemble a video game. It required the subjects to trace the contour (formed by two black lines spaced 1.7 cm apart) of a geometrical shape with an inverted mouse using their dominant hand, as quickly as possible. With the inverted mouse, the relationship between the movements of the mouse and the movements of the cursor was rotated by 180°: when the mouse was moved to the left or down, the cursor would move to the right or up, and vice versa. The instruction was to follow the contour of the figure as quickly and as accurately as possible in order to “catch” various toys appearing on the screen (inside the contour) without leaving the limits of the contour. If the cursor moved outside the parallel lines, the participant had to reposition it at the place where it had veered off (indicated by a red square on the contour of the shape) in order to continue the task. On each trial, the time (seconds) to trace the entire figure and the number of errors (number of times that the cursor veered outside the contour) were recorded by the computer.

Before starting the experiment, the subject was asked to trace a square with the normally oriented mouse. The purpose of this initial measure was to control whether, within each group, performance with the mouse (in its usual orientation) might influence performance with the inverted mouse. Immediately after this initial control measure, subjects were asked to trace other geometrical shapes, this time with the inverted mouse.

Training task. Children were told that they would have to learn to use the inverted mouse by tracing the contour of the same triangle several times. The base of the triangle was 23.5 cm wide and its height was 11.5 cm. The training task took place

during the first session and included four blocks of three trials. A short break was provided between trials, as well as a longer break after two blocks. In order to keep the participant motivated and focused on the task, at the end of each trial a message was displayed on the screen congratulating the participant and presenting some information about the next mission (e.g., “Congratulations! Now, you must help Scrat to collect his nuts.”).

Transfer task. An important aspect of procedural learning concerns the “generalization” of the learned skill (Seidler, 2007). Indeed, the ability to apply the new skill to a situation different from the one in which it was trained is an indicator that it has been actually learned (i.e., that the subject did not simply learn the specific movements that had to be performed during training). Thus, we examined the transfer of the ability to a different and more complex task, and explored whether subjects’ performance on this transfer task remained stable after a one-week delay. For that, subjects had to trace a five-pointed star (16.5 cm wide from one point to the opposite one) with the inverted mouse. This transfer task was performed three times, once before the training task (i.e., pretest) and two times after (i.e., posttest). The posttest was administered immediately after the training task (immediate transfer task), and in a second session following a one-week delay in order to test long-term retention of the skill (delayed transfer task).

Executive tasks

To evaluate impact of executive functions on the procedural learning task, participants’ performance on tasks testing three core executive processes (inhibition, flexibility, and working memory: Miyake et al., 2000) was measured.

Inhibition. We used two versions of the Simon Task, adapted from Germain and Collette (2008) for the adults and from Catale, Germain, and Meulemans (2011) for the children, in order to assess the ability to inhibit inappropriate motor responses and ignore irrelevant characteristics of perceptual stimuli (subtests 3 and 5). All responses were given using either a left (“q”) or right (“l”) response key on a standard AZERTY keyboard. At the beginning of each subtest, participants were instructed to respond as quickly as possible while avoiding errors. In subtest 3, the 80 trials involved an arrow (in the adult version) or a running dog (in the child version) appearing randomly on either

the left (40 trials) or right (40 trials) side of the screen. Participants had to ignore the location of the dog or the arrow and press the key on the side indicated by the direction of the arrow or the direction in which the dog was running. Only the data from the 40 items requiring perceptual inhibition were analyzed. In the 40 trials of subtest 5, participants were asked to press the key that was opposite to where the centrally located arrow was pointing or the central dog was running. Inhibition scores consisted of z-scores for time on each test (Simon 3 and Simon 5).

Cognitive flexibility. All subjects were also given an adaptation of a flexibility task (TAP; Zimmerman & Fimm, 2009), which assesses mental switching between two sets of targets (letters and numbers). Two stimuli—one letter and one number—are presented simultaneously on the screen, one on the left side and the other on the right side of a fixation point. Stimulus presentation is random: the letter could appear on the left side and the number on the right, or vice versa. Subjects had to press the response key (“q” or “l” on the keyboard) located on the same side as the target, which alternated on successive trials (letter-number-letter-number, etc.), as quickly as possible. The task included 60 trials. When subjects made an error, they were warned by an acoustic tone and given the next target stimulus. Median response times (ms) were recorded for subsequent analysis.

Working memory. Working memory was assessed using the Letter-Number Sequencing and Backward Digit Span tests from the WISC-IV (Wechsler, 2005) and WAIS-III (Wechsler, 2000). The working memory score consisted of z-scores for each of the two tests.

PROCEDURE

All subjects were tested individually in a quiet room in two sessions separated by a one-week interval. In the first session, they performed the initial control task (with the mouse in its usual orientation), the pretest measure (tracing a star with the inverted mouse), the procedural training task (tracing triangle with the inverted mouse, comprising 4 blocks of 3 trials), and the posttest (i.e., the immediate transfer task). The second session included the second posttest (i.e., the delayed transfer task) and the executive tests.

RESULTS

Logarithmic transformations were performed on tracing time and errors on the computerized mouse tracing task in order to increase homogeneity of variance. Among the total sample, 3 10-year-old children and 1 adult were removed from all analyses because their total number of errors and/or their tracing time in the procedural task was more than 2.5 standard deviations from the mean for their group. All effects were assessed for significance at the $p = .05$ level. For planned comparisons, a Bonferroni correction was used to correct for the use of multiple tests (Type I error).

Initial performance with the mouse in its usual orientation

Age group differences in the ability to handle the mouse were revealed through an analysis of variance (ANOVA) on tracing time in the initial tracing task. There was a significant main effect of age group on tracing time, $F(2, 69) = 17.12$, $p < .001$, $\eta^2_p = .33$. Planned comparisons indicated that 7-year-olds' performance was significantly slower than that of 10-year-olds and adults (respectively, $M = 29.96$; 20.43 ; 14.50); a marginal difference in speed between 10-year-olds and adults was found ($p = .06$).

Did the familiarity with the use of the mouse in its usual orientation have an impact on performance with the inverted mouse?

Correlations performed within each age group between initial performance (with the mouse in its usual orientation) and the first inverted mouse task (pretest) were not significant (all $ps > .05$), indicating that initial familiarity with the use of a computer mouse had no impact on the use of the inverted mouse during the inverted mouse task.

Perceptuomotor procedural learning

In order to investigate whether there is any age-related improvement in procedural learning, we analyzed (1) performance and learning rate (i.e., the difference between Block 1 and Block 4) on the training task, (2) the transfer of the ability to a different figure, and (3) its retention after a one-week delay.

Training task (triangle), Blocks 1 – 4

Participants' tracing time and errors for each block are illustrated in Figure 8. Although logarithmic transformations were computed on the data, the figure shows untransformed data per block to facilitate comprehension. To assess the performance and the learning rate during the training task, ANOVAs with age group as a between-subjects variable (3 groups) and block as a repeated measure (4 blocks) were performed (1) on speed of performance (mean tracing time by block), and (2) on error rate (mean number of errors by block).

Speed of performance. Results showed a significant main effect of block, $F(3, 207) = 107.45, p < .001, \eta^2_p = .61$, a significant age group effect, $F(2, 69) = 33.82, p < .001, \eta^2_p = .50$, and a significant Age group \times Block interaction, $F(6, 207) = 4.15, p < .001, \eta^2_p = 0.11$. This interaction showed that, while all groups improved their completion time between B1 and B4, the improvement was not equivalent in the three age groups. Planned comparisons showed that although 7-year-olds performed more slowly than 10-year-olds on the first three learning blocks, the difference was no longer significant on the last block. Seven-year-olds showed a more pronounced improvement in speed between the first and last blocks than 10-year-olds; however, this result was due to the 7-year-olds' particularly slow performance on the first block. In contrast, although the adults performed the task significantly faster than the 10-year-olds within each block, the decrease in tracing times between Block 4 and Block 1 was similar in the two age groups.

We also wanted to determine whether age group differences with the inverted mouse would remain after controlling for the ability to use the mouse in its usual orientation. To do so, an analysis of covariance (ANCOVA) was conducted with age group as an independent variable, tracing time during Block 1 as dependent variable, and speed of performance with the mouse in its usual orientation as covariate. Differences among age groups on the training task remained significant after the initial speed measure with the normally oriented mouse had been controlled for, $F(2, 68) = 16.50, p = .001$.

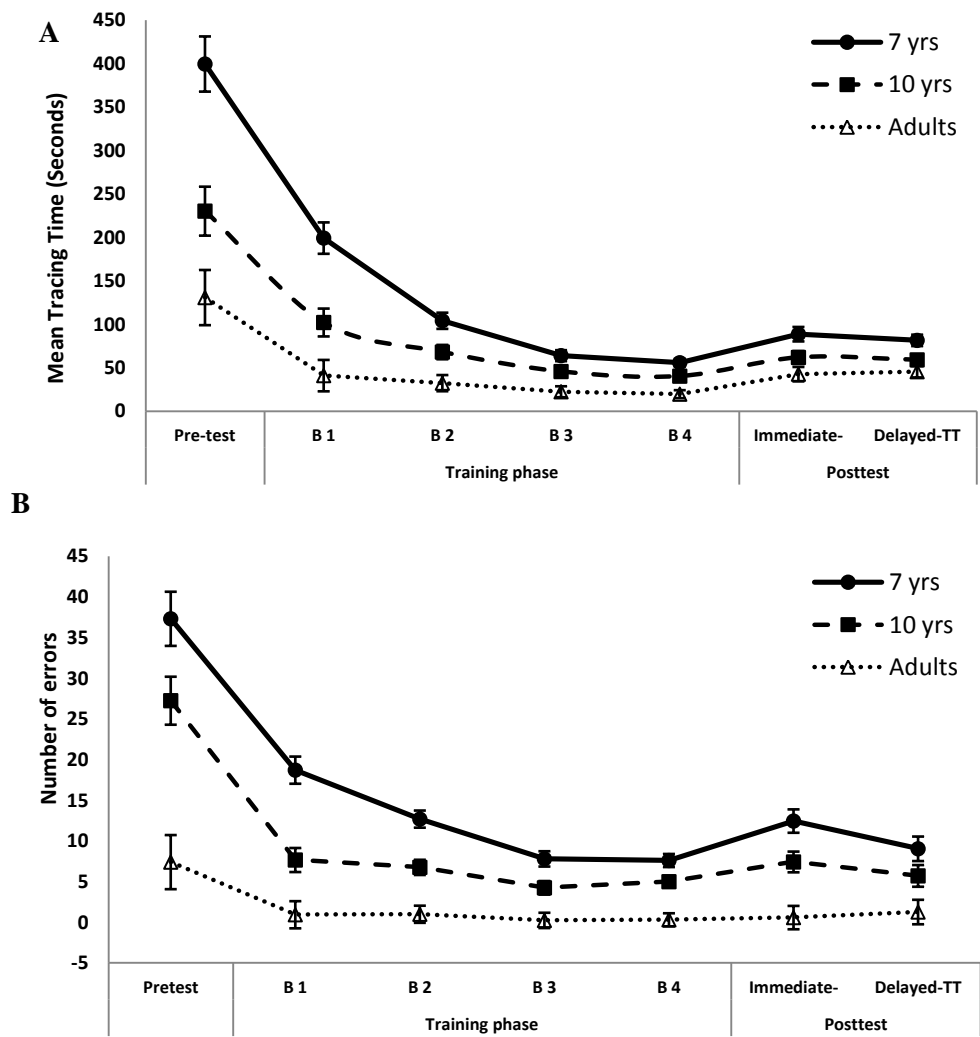


Figure 8. Learning patterns of 7- and 10-year-old children and adults. Data points indicate tracing time (A) and number of errors (B) by age group in the inverted mouse tracing learning tasks for each stage (triangle for training and star for pretest and posttest). Error bars represent standard errors.

Error rate. The same analyses were carried out on numbers of errors, and generated results close to those obtained for the time measure: there were significant main effects of both age group, $F(2, 69) = 61.25$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .64$, and block, $F(3, 207) = 29.48$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .30$, as well as a significant Age group \times Block interaction, $F(6, 207) = 6.79$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .16$. Planned comparisons showed that 7-year-olds made significantly more errors than 10-year-olds on the first three learning blocks, and that 10-year-old children made more errors than adults on each block. Furthermore, intragroup comparisons showed differences across blocks: although the number of errors decreased between the first and last blocks for the 7-year-old children and, more marginally, for the 10-year-old children ($p = .06$), this was not the case for adults. The latter result can be explained by a floor effect, as adults committed very few errors during the task ($M = 1.85 \pm 2.2$).

Transfer task (star)

Transfer to a different figure was tested by comparing performance (speed and error rate) between the pretest (before the training task) and the posttest (immediately after the training task; i.e., immediate transfer task). Results are illustrated in Figure 8.

Speed of performance. A 3 (Age Group) \times 2 (Test) ANOVA with repeated measures on the second factor showed main effects of age group, $F(2, 69) = 19.01$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .35$, and test, $F(1, 69) = 325.50$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .82$, and a significant Age Group \times Test interaction, $F(2, 69) = 7.68$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .18$. Performance on the immediate transfer task was faster than on the pretest in all groups. As for the training task, 7-year-olds improved more between the two tests than 10-year-olds, but improvement in 10-year-olds and adults was similar.

Error rate. The same analyses on the number of errors showed significant main effects of test, $F(1, 69) = 91.38$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .57$, and age group, $F(2, 69) = 52.97$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .60$. No interaction was revealed, indicating that the error reduction between the pretest and the posttest (immediate transfer task) was similar in all age groups.

In addition, we checked whether this generalization effect would also be observed in a comparison of tracing time and error rate between the last trial of the training task (with triangle) and the immediate transfer task (with star). As previously, both the effects of

test (respectively, $F(1, 69) = 102.66, p < .001, \eta^2_p = .60$; $F(1, 69) = 8.63, p = .004, \eta^2_p = .11$) and age group (respectively, $F(2, 69) = 18.37, p < .001, \eta^2_p = .35$; $F(2, 69) = 44.25, p < .001, \eta^2_p = .56$) were significant. Interestingly, the absence of a significant interaction suggests that transfer was similar in all age groups (respectively, $F(2, 69) = 2.54, p = .09, \eta^2_p = .06$; $F(2, 69) = 1.26, p = .29, \eta^2_p = .03$).

Delayed transfer task (star)

Retention of the perceptuomotor skill over a one-week delay was examined by comparing the time taken by each age group to trace the pattern on the immediate transfer task and after a one-week delay (delayed transfer task). The effect of age group was significant (for completion time: $F(2, 69) = 12.07, p < .001, \eta^2_p = 0.26$; errors: $F(2, 69) = 26.02, p < .001, \eta^2_p = 0.43$), but there was no significant effect of block (for completion time: $F(1, 69) = 0.05, p = .81, \eta^2_p < 0.001$; errors: $F(1, 69) = 3.51, p = .06, \eta^2_p = .04$), and no significant interaction (for completion time: $F(2, 69) = 0.52, p = .59, \eta^2_p = 0.01$; errors: $F(2, 69) = 2.71, p = .07, \eta^2_p = 0.07$). This analysis showed that the delayed transfer task was executed as well as the immediate transfer task in all age groups.

Correlation analyses

To study the link between executive functions and procedural learning during the first and last steps of the training process in each age group, Pearson's correlation analyses were conducted between measures of the three executive functions (inhibition, flexibility, and working memory) and Blocks 1 and 4 of the training task. Because completion time and number of errors on the training task were highly correlated (Block 1: $r = .76, p < .001$; Block 4: $r = .73, p < .001$), the two dependent measures were standardized within each block and combined into a composite z-score (see Kennedy & Raz, 2005). Thus, we had two indices (Z-Block 1 and Z-Block 4) which were submitted to correlation analyses. Partial correlations were carried out to control for a motor speed effect using performance time on the control task with the mouse (i.e., in its usual orientation). All correlations are shown in Table 1.

Table 1

Correlations between executive functions and procedural performance (first and last training block) by age group

| Measure | <u>7-year-old children</u> | | | <u>10-year-old children</u> | | | <u>Adults</u> | | |
|-----------|----------------------------|-------------|------|-----------------------------|-------------|------|---------------|-------------|------|
| | Inhibition | Flexibility | WM | Inhibition | Flexibility | WM | Inhibition | Flexibility | WM |
| Z-Block 1 | -.04 | -.00 | -.08 | .71*** | .22 | -.25 | .54* | .37 | -.31 |
| Z-Block 4 | -.09 | .09 | -.23 | .25 | .28 | -.01 | .30 | .04 | -.28 |

Note. WM = working memory.

* $p < .05$, *** $p < .001$

Block 1. In 7-year-old children, no correlation was significant. In 10-year-old children, there was a significant correlation between Block 1 of the training phase and inhibition z-score (time), $r = .71$, $p < .001$. No significant correlation was found with working memory or flexibility. In the adult group, the correlation between Block 1 and z-score for inhibition (time) was also significant, $r = .54$, $p = .01$, and, as in 10-year-olds, no significant correlation with working memory and flexibility was found.

Block 4. As predicted, no significant correlation was found between executive processes and performance on the fourth block of the training phase in any group.

DISCUSSION

The main objectives of this study were (1) to determine whether procedural learning performance improves with age by comparing groups of 7-year-old children, 10-year-old children, and adults, and (2) to investigate the role played by executive functions during the first and last stages of the acquisition of the skill in these three age groups. To do so, we created a computerized adaptation of the mirror tracing paradigm in which participants had to trace a geometric shape with an inverted computer mouse.

Overall, our results showed a decrease in both tracing time and number of errors with practice in all age groups: all subjects learned the skill regardless of their age. Importantly, the ability of the children to transfer the skill to a different figure was similar to that of adults. Thus, the subjects did not simply learn the specific movements that

had to be performed in the training task, but were able to apply the new skill to a situation different from the one in which it was trained. Furthermore, performance on the transfer figure remained stable after a one-week delay in all age groups.

More specifically, performance on the training task offers us information on how subjects acquired the inverted mouse task. Although the adults performed the task significantly faster than the 10-year-olds within each training block, improvement in the two age groups was similar. On the contrary, the performance of 7- and 10-year-old children differed, revealing an effect of age in this range. Indeed, the youngest children showed the predicted pattern: they had much more difficulty adapting to the task at the beginning of the learning process (they were slower and committed more errors in the three first learning blocks) than 10-year-olds. Importantly, 7-year-olds' performance attained the same level as that of 10-year-olds at the end of the learning process (in the fourth block of the training task). Therefore, our results showed two different things: first, that 7-year-old children had more difficulties with adaptation during the first training blocks, and second, that their learning curve confirms their ability to learn this new procedural skill as well as 10-year-old children do (the youngest children even learned at a higher rate). Ferrel-Chapus et al. (2002), using a quite similar task administered to 5- and 7-year-old children as well as to older children and adults, had already shown adaptation difficulties during the first learning step in the youngest children, followed by a significant improvement which was particularly pronounced in 5- and 7-year-olds. A similar pattern of results has also been shown with a mirror tracing task in children with spina bifida compared to controls (Edelstein et al., 2004), and in studies comparing elderly and young participants (Beaunieux, Hubert, Pitel, Desgranges, & Eustache, 2009; Brosseau et al., 2007). The youngest children's greater improvement during the training task need not be interpreted as a reflection of greater learning capacity; rather, their learning curve is steeper due to poor initial performance (which leads to greater potential improvement). To further examine whether procedural learning performance differs with age, we also investigated the transfer of the learned ability to a shape different than the one used during training. The results confirm that, although their initial performance levels were different, children and adults had a similar ability to apply the new skill to a different situation (as attested by a comparison of the last trial of the training task with the immediate transfer task).

While age-related developmental differences are observed at the beginning of learning, it is difficult to determine precisely what mechanisms underlie them. As a first step, we verified that the initial difficulties of the youngest children were not due to a weaker ability to use the computer mouse. Our results showed that performance at the beginning of the inverted mouse task was not correlated with performance on the initial measure with the mouse used in its usual orientation in any of the three age groups. In addition, a covariance analysis controlling for performance speed with the normally oriented mouse confirmed the age group effect on performance in the first block of the training phase, showing that this speed measure did not explain the difference between age groups on the first block. Age-related differences in procedural learning appears to be more related to the nature of the task and, more specifically, to the type (and importance) of executive control required by the task. Indeed, the cognitive processes involved in the perceptuomotor adaptation tasks could be different from those usually demanded in other procedural tasks (Rouleau, Salmon, et al., 2002). In this task, subjects have to inhibit an overlearned association between visual perception and the hand movements used while tracing, contrary to other tasks such as Pursuit Rotor, for example. Similar adaptation difficulties during the initial phases of perceptuomotor adaptation tasks have been reported in patients with prefrontal lesions (Schmidtke et al., 2002), as well as in elderly people, probably due to a decline in executive functions (Brosseau et al., 2007). In children, a great improvement in executive processes has been found between 6 and 9 years of age (e.g., Tillman, Thorell, Brocki, & Bohlin, 2008). In view of this, the initial differences observed in our study between 7 and 10 years could be related to the time course of the development of executive functions during childhood.

In this context, the second objective of this study was to investigate the role played by three executive functions (working memory, inhibition, and flexibility) in three age groups during the first and last phases of the procedural learning process, which was done using correlation analyses. To our knowledge, this study is the first to investigate the role of these functions in procedural learning in children. Although results must be interpreted with caution given the small number of subjects, they show, as expected, that inhibition abilities play a significant role in the performance of 10-year-olds and adults at the beginning of the training task (Block 1); no significant correlations were

observed with flexibility or working memory. They also show that the involvement of inhibitory control dwindles with training: correlations were no longer significant at the end of the training task (Block 4). These results confirm that the ability becomes progressively less controlled and more automatic, which is consistent with a top-down conception of learning (Anderson, 1982; Beaunieux et al., 2006; Doyon & Benali, 2005) and, more specifically, with the current literature on perceptuomotor adaptation tasks which suggests that inhibitory control would be particularly important in the first step of learning (e.g., Brosseau et al., 2007). On the other hand, correlation analyses showed no relation between 7-year-olds' executive functions and their performance at the beginning of the training phase. Overall, these findings suggest that the task used in this study elicits explicit processing (such as inhibition) at the beginning of learning: thus, adults and 10-year-old children likely outperformed the youngest children because of their superior inhibition processing abilities. Indeed, several studies have shown that inhibition is mature at around age 10 (e.g., Welsh et al., 1991). On this view, the youngest children had more difficulty performing the task during the early learning stage, because their inhibition abilities could be not sufficiently developed to help them to perform the task. Thus, they may rapidly switch from explicit strategies to more implicit learning processes, permitting them to perform as well as 10-year-old children by the end of training (because implicit processes are less age-dependent).

However, the developmental literature on procedural learning (e.g., Karmiloff-Smith, 1992) leads us to consider an alternative hypothesis, according to which procedural skill learning need not involve explicit declarative knowledge and that the knowledge acquired can be stored in an implicit form as soon as learning begins. In this view, the 7-year-old children in our study may have started the procedural task in a less controlled fashion than older children and adults because their explicit mechanisms (including inhibition) are less developed than those of older children; this would at least partially explain the absence of correlation between inhibition measures and procedural performance in 7-year-olds, but also why they made so many errors at the beginning of learning. In favor of this view, several studies in children using perceptuomotor adaptation tasks have yielded results which suggest that children and adults use different strategies to adapt their movements: Ferrel-Chapus et al. (2002) showed that, in mirror tracing situations, the youngest children (5- and 7-year-olds) have more

difficulties understanding the visual disturbance, whereas older children are aware of the rotation. Tahej et al. (2012) confirmed this hypothesis, showing that, when confronted with large perceptuomotor rotations (larger than 45°), 5-year-old children have difficulty performing the mental rotations and, unlike adults, do not seem to use explicit strategies to reach the target.

In summary, the present study offers new information on the development of procedural learning in adaptation tasks involving the inhibition of an overlearned response in order to create a new visuomotor association. Like the results of some previous studies (e.g., Ferrel-Chapus et al., 2002), our findings indicate that, in this context, age has an effect on performance in the initial phases of learning, but not on the learning rate (in fact, due to their poor initial performance, the learning rate of the youngest children was higher than that of the older groups). We suggest that this age effect could be at least partly related to the time course of the development of executive functions during childhood; specifically, in the inverted mouse task that we used in this study, inhibition abilities seem to have played an important role in the initial (i.e., in the first block) performance of 10-year-olds and adults, but not of 7-year-olds (probably because these functions are not yet sufficiently developed in this age group). Moreover, inhibition clearly cannot in itself explain all of the observed group differences. The fact that the progressive emergence of other abilities, such as visual and proprioceptive integration (Ferrel-Chapus et al., 2002), is not complete in young children might also contribute to their difficulties with sensorimotor adaptation. Certainly, executive processes contribute to diminishing error production, to the planning of efficient behavior and to the inhibition of inappropriate routines, helping to optimize performance early in the learning process; however, the still partial development of the youngest children's executive processes does not prevent them from learning a perceptuomotor skill as well as older children and adults. Therefore, one of important result of this study is that, while inhibition functions, so long as it is sufficiently developed, may play a key role during the first steps of learning a new skill that requires perceptuomotor adaptation, they would not be a necessary condition for learning to occur. Currently, it remains difficult on the basis of either our results or the literature in general to determine which processes, implicit or explicit, are involved in the early learning phase in young children. Further studies, using, for instance, a dual-task paradigm, are needed in order to fully understand the

role of explicit mechanisms at the beginning of procedural learning at different stages of development. Studies on procedural learning in children are still too limited, and research in this area should also continue in the future in order to further our understanding of the nature and (the importance) of the executive mechanisms involved in procedural learning by comparing different paradigms (including situations that do not require the inhibition of an overlearned association between vision and motor behavior).

AGE DIFFERENCE IN DUAL-TASK INTERFERENCE EFFECTS ON PROCEDURAL LEARNING

Caroline Lejeune, Lise Desmottes, Corinne Catale, and Thierry Meulemans

Accepté sous réserve de modifications dans *Journal of Experimental Child Psychology*

INTRODUCTION

According to classical conceptions of procedural learning (i.e., the acquisition of cognitive, perceptual or perceptuomotor skills through repeated practice), skill learning involves a series of stages wherein knowledge is first stored in an explicit form and then converted into procedural knowledge (Anderson, 1982; Fitts & Posner, 1967). This top-down conception of learning postulates that, in the initial phase of learning, skills are mostly acquired through an explicit, attention-demanding learning mode (i.e., the learner develops explicit knowledge of how to execute the task). With practice, the skill progressively becomes implicit and automatic⁶⁷. Performance in this last step is thus unaffected by a concurrent secondary task (Chauvel et al., 2012).

This conception has received experimental support from a number of studies conducted in adults with perceptuomotor adaptation tasks such as mirror tracing (e.g., Kennedy et al., 2008). In the mirror tracing task, participants have to trace a figure with a pencil while seeing the action of their hand only in a mirror. Because the task involves multiple trials and subjects are instructed to perform it as quickly and precisely as possible, the learning of the mirror tracing task can be considered explicit in the sense that participants “know” from the beginning that they have to acquire the skill (i.e., learning is neither implicit nor incidental in the sense given to these words in implicit learning situations). There is evidence that cognitive resources play an important role in perceptuomotor adaptation tasks, at least in the initial learning phases. For instance, Kennedy et al. (2008) demonstrated that working memory was involved in the learning of the mirror tracing task and could partially account for the degradation in acquisition of the skill with age observed in elderly subjects. Inhibition abilities may also be recruited in mirror tracing: one particularity of this task is that it requires subjects to modify a well-learned association between vision and a motor behavior (Brosseau et al., 2007). Eversheim and Bock (2001) confirmed the involvement of explicit processes in procedural learning, finding that a concurrent secondary task interfered with the early learning phase of a perceptuomotor skill. And finally, neuroimaging studies have

⁶⁷ In this article, we use the terms “implicit” and “automatic” in reference to the idea that learning proceeds with minimal demands on attentional resources and “can proceed normally in the presence of concurrent resource-demanding tasks and therefore qualifies as an automatic process” (Shanks, 2003, p. 11). The term “explicit” is used in reference to the idea that the learning is effortful and attention-demanding.

strengthened this view, showing that particular prefrontal brain regions are recruited in the early stages of skill learning (Anguera et al., 2007).

While it is generally admitted that effective procedural learning occurs early in childhood, empirical data supporting this view are more limited than in adults. Most studies on procedural learning in children have used implicit learning paradigms like the Serial Reaction Time task (e.g., Meulemans et al., 1998; Thomas & Nelson, 2001), showing that implicit learning mechanisms are relatively age-independent. However, the applicability of the top-down approach to procedural learning (Anderson, 1982) in children - in other words, the role that explicit processes may play in perceptuomotor adaptation tasks at these ages - remains an open question. Indeed, given the immaturity of young children's working memory and executive functions, how can the alleged efficiency of procedural learning in early childhood be reconciled to this top-down approach? Is the top-down approach to skill learning described in adults applicable to young children whose explicit mechanisms are still developing?

Because very few studies have investigated procedural learning in children with tasks like mirror tracing, little is known about the role played by explicit cognitive processes in such tasks during childhood. Generally, these studies have focused on comparing the learning performance of children of different ages, but not on the processes underlying procedural learning. For instance, Ferrel-Chapus et al. (2002) tested the ability of children aged between 5 and 11 years, as well as a group of adults, to draw a figure without seeing their hand, and with a view of the scene that was rotated by 180°. The results showed differences in performance with age at the beginning of the learning process, but not in the acquisition rate. More recently, Tahej et al. (2012) showed with a similar task that 5-year-old children have difficulty performing the required mental rotation and, unlike adults, do not seem to use explicit strategies to perform the task. We recently explored the perceptuomotor procedural learning capacities of two groups of children (7- and 10-year-olds) and a sample of adults, as well as the role played by executive functions during skill acquisition in these three groups (Lejeune, Catale, Schmitz, & Meulemans, 2013). As in previous reports, our results showed that age has an effect on performance in the initial learning phases, but also reflected similar learning effects in the three groups. In addition, our results showed that executive

functions (and more specifically inhibition abilities) played a significant role in the performance of 10-year-olds and adults at the beginning of the training phase, but not in that of 7-year-old children. These results suggested that the mechanisms underlying the learning process differ according to age. However, it remains difficult to determine which processes, implicit or explicit, are active during skill learning in children on the basis of the existing literature.

The main objective of the present study was thus to investigate the role played by explicit mechanisms during the early and final stages of a mirror tracing task in two age groups of children (7 and 10 years old). More specifically, we wanted to test the assumption that the mechanisms involved during learning would differ according to training stage and the state of development of cognitive capacities. Indeed, although traditional theories postulate that the initial learning phase of skill acquisition is mostly sustained by explicit processes (Anderson, 1982), some authors have argued that skill learning may initially operate at an implicit level from the outset and that children may shift progressively during development from an implicit, automatic learning mode to a more explicit one (Karmiloff-Smith, 1992; Maxwell et al., 2003; Sun et al., 2001; Willingham & Goedert-Eschmann, 1999). However, to the best of our knowledge, this conception has not yet been empirically investigated in children with perceptuomotor adaptation tasks like the mirror tracing paradigm. Studies in adults have shown the utility of the dual-task paradigm for offering information about the mechanisms underlying procedural learning (Eversheim & Bock, 2001; Foerde, Knowlton, & Poldrack, 2006; Frensch et al., 1994; Masters, 1992). In this study, we compared the effect on performance of an auditory interference task, performed at the beginning and the end of the learning process of a procedural task, in two groups of children—7-year-olds and 10-year-olds—chosen for contrast in the level of maturity of their explicit learning mechanisms. The introduction of a concurrent cognitive task (i.e., an interference task that demanded additional attentional resources) should affect explicit processes more than implicit processes, the latter being more automatic (Sun et al., 2001). Specifically, if explicit mechanisms are active at the outset of learning (Anderson, 1982), performing a concurrent secondary task should result in a performance deterioration during this phase. On the other hand, performance during the last phase of learning should be relatively unaffected by the interference task.

However, in young children, because we hypothesized that automatic, implicit processes may predominate even in the first stage of learning, our prediction was different: the effect of the interference task should be lower in this age group. To summarize, we made three predictions: (a) in the early learning phase, the impact of the dual task would differ between the two age groups: the concurrent secondary task should have a greater effect on performance in 10-year-old children than in 7-year-old children; (b) the dual-task condition would affect performance only during the first learning phase (the cognitive stage that calls on explicit mechanisms such as working memory and attentional resources), and not at the end of the learning process (because at this stage the skill can be performed automatically); and (c) during the first learning phase, 7- and 10-year-old children should perform at the same level in the dual-task condition (when automatic, implicit processes prevail), but in the single-task condition younger children's performance should be worse (because in this condition older children can use explicit, effortful processes to perform the task). Finally, we also explored the impact of age and learning condition (single or dual task) on the learning curve.

METHOD

Participants

A total of 76 right-handed children were recruited in schools in the French-speaking part of Belgium. They were divided into two age groups: 7-year-olds ($M_{\text{age}} = 7$ years 6 months [7;6]; range = 6;10-8;1; 22 girls and 16 boys), and 10-year-olds ($M_{\text{age}} = 10$ years 6 months [10;6]; range = 9;11-11;3; 22 girls and 16 boys). Each age group corresponded to one primary school level, the youngest children being in the second grade and the 10-year-olds being in the fifth grade.

All children were free of any psychiatric, neurological, developmental, or learning disorders, as determined by the parent's report on a medical history questionnaire. The education level of each child's mother was rated from 1 to 5 (from "primary education" to "university education"); a χ^2 test showed no age group differences ($p > .05$), indicating that our sample can be considered homogeneous with regard to parental education level. The local research ethics committee approved the study and we received parental informed written consent for all participants.

All participants performed above the fifth percentile on the Raven Progressive Matrices (Raven et al., 1998). Cognitive tasks were also administered to better characterize the children in terms of a set of high-level cognitive functions (inhibition, switching, and working memory). See Table 2 for the performance profiles of both age groups. The performance of the 7-year-old group was poorer than that of the 10-year-old group on explicit tasks measuring executive functions.

Table 2
Executive performance in the two age groups

| Tests | 7-year-old children | | 10 year-old children | | t(73) | p |
|--|---------------------|--------|----------------------|--------|-------|-------|
| | M | SD | M | SD | | |
| Inhibition | | | | | | |
| <i>Stroop (interference index)</i> | 26.84 | 10.12 | 18.59 | 6.02 | 4.27 | <.001 |
| <i>Simon task (interference index)</i> | 107.24 | 90.63 | 63.24 | 53.34 | 2.55 | .01 |
| Switching | | | | | | |
| <i>Flexibility (time in ms)</i> | 1323.11 | 311.69 | 1001.43 | 212.11 | 5.19 | <.001 |
| <i>Flexibility (errors)</i> | 5.35 | 3.01 | 3.46 | 2.65 | 2.87 | .005 |
| Working memory | | | | | | |
| <i>Working memory (time in ms)</i> | 1180.43 | 338.43 | 923.51 | 239.57 | 3.77 | <.001 |
| <i>Working memory (errors)</i> | 6.70 | 5.65 | 3.51 | 3.99 | 2.80 | .006 |

Note. Following the model of Miyake et al. (2000), the following executive tasks were administered. [1] Inhibition skills were assessed using two tasks: the Interference Fruit Task (Catale, Lejeune, Schmitz, & Meulemans, in press) and the Simon Task (Nassauer & Halperin, 2003, adapted for children by Catale, Germain, & Meulemans, 2011). An inhibition score (i.e., interference index) was calculated for the two tasks (time for interference condition – time for control condition). [2] The switching process was evaluated using the flexibility task from the TAP battery (Test for Attention Performance, Zimmerman & Fimm, 1994). [3] Working memory was assessed using an updating task (2-back task) from the TAP battery.

Measures

Procedural learning task

In the mirror tracing task, a 5-point star with a 1-cm-wide outline was presented on a white sheet of paper fixed to a platform. A nearly vertical opaque barrier was positioned such that the child could see the paper sheet and his/her hand only through a mirror placed vertically in front of him/her. The children were instructed to draw the contour of the star with a pencil using their dominant hand, reflected in the mirror, as quickly and accurately as possible without going outside the lines of the contour. If they went outside the parallel lines of the contour, participants had to reposition the pencil where it had veered off in order to continue the task. To maintain a sufficient level of motivation, especially in young children, the task was presented as a game, with pictures of cars posted on the track; the children were told that they would “catch” the cars while passing over them with the pencil.

In order to familiarize themselves with the task, the children were first asked to trace the star using normal vision—i.e., without the mirror. The training task (with the mirror) included 10 trials, with a short break (2 minutes) between trials. A second session of 10 trials was administered after a one-week delay. For all trials, two measures were considered: tracing time (in seconds) and number of errors (following the methodology of Brosseau et al., 2007: 1 error was counted if there is an exit from the outline of >1 mm with re-entry ≤ 2 cm from the exit point; 2 errors were counted if the re-entry was more than 2 cm from the exit point; and 3 errors were counted if the edge of the outline was crossed several times at the same place).

Interference tasks

Six auditory interference tasks were presented in a pilot test to 10 children aged from 7 to 10 years old. Following the recommendations of several authors (Miyahara, Piek, & Barrett, 2006; Tsai et al., 2009), we created tasks that were meaningful to children (rather than the traditional backward digit or tone counting tasks) to keep children motivated and focused on the interference task. The two tasks that were the most appreciated and successfully completed by the children in the pilot test were retained for the experiment. In the first task (the “comparison task”), the children heard two

names of animals or objects and were instructed to verbally respond by repeating the name of the largest one (for example: “butterfly and cat”). In total, the task was composed of 180 different comparisons (in order to cover the whole duration of the mirror tracing task). The second interference task (the “questions task”) consisted in answering questions whose answer should be quite obvious for young children (for example: “What is your favorite animal?” or “Who brings the presents at Christmas?”). The items were recorded by a female speaker and were read at a normal rate. Each interference task was presented with a one-second constant interstimulus interval in order to prevent self-paced allocation of attentional resources between the main task and the interference tasks (Rohrer & Pashler, 2003). In total, the task was made up of 164 questions. The percentage of answers (i.e., the number of answers given divided by the number of items presented, multiplied by 100) was recorded for each block (of the mirror-tracing task).

Procedure

All children were tested individually in a quiet room in their school. All the tests were administered over two 45- to 60-minute sessions. In each age group, the children were randomly assigned to one of the two learning conditions: single- or dual-task. For the 7-year-old group, there were 19 children in each condition. One 10-year-old child was excluded from all analyses because his completion time on the procedural task was more than 3 SD from the mean for his group. As a result, for the 10-year-old group, there were 18 children in the dual-task condition and 19 children in the single-task condition.

In the single-task condition, children performed only the mirror tracing task. In the dual-task condition, they performed the mirror tracing task while concurrently performing an auditory task. In order to better understand the processes involved during the early and late learning phases of a procedural learning task, the interference task was introduced only during the first two learning trials (i.e., trials 1 and 2 of the first session) and the last two learning trials (i.e., trials 19 and 20 of the second session) of the mirror tracing task. Half of the dual-task participants were administered the questions task during the first two trials, and the comparison task during the last two trials, and conversely for the other half.

Analysis

In order to examine the impact of the interference task at the beginning and the end of the training task in each age group, a 2 x 2 x 2 repeated measures ANOVA with learning phase (the two first and the two last trials) as a within-subjects factor and age group (7 and 10 years old) and learning condition (single- and dual-task) as between-subjects factors were performed on (1) speed of performance (mean tracing time for the two first *versus* the two last trials), and (2) errors (mean number of errors for the two first *versus* last trials). In order to test our hypothesis we conducted a set of planned comparisons; in the Results section we present only the results of these analyses. The percentage of answers on the auditory interference task (which was performed concurrently during the first and last learning phases of the procedural task for participants in the dual-task condition) was also analyzed to ensure that differences in the primary task did not result from differential performance on the interference task. And finally, in order to examine the effects of age and learning condition (single- or dual-task) on the procedural learning process, completion time and number of errors on the trials performed without the interference task (trials 3 to 18) were subjected to an ANOVA. The between-subjects factors were age group (7- and 10-year-olds) and learning condition (single- or dual-task), and the within-subjects factor was trial number (16 levels). Greenhouse–Geisser corrections are reported where sphericity was violated.

For the measures of performance on the mirror tracing task, square transforms for errors and log transforms for completion times were used in order to obtain a normal distribution (Zar, 1999). All effects were assessed for significance at the $p < .05$ level.

RESULTS

Dual-task condition effect during the mirror tracing task

Figure 9 A and B show the untransformed completion times and number of errors for the first and last learning phases of the mirror tracing task for each age group as a function of learning condition. First, we wanted to verify whether the impact of the dual task in the early learning phase would differ between the two age groups. The results confirmed our prediction, showing a significant Age Group x Learning Condition

interaction effect on response accuracy, $F(1,71) = 6.85$, $p = .01$, $\eta^2_p = .09$: 10-year-old children were more affected by the dual task than 7-year-old children. For completion time, an effect was also found, $F(1,71) = 4.01$, $p = .049$, $\eta^2_p = .05$. Interestingly, in contrast with 10-year-old children, no performance difference was found in 7-year-olds between the single- and dual-task conditions during the first learning phase ($p > .10$).

To test our second hypothesis, we compared the effect of the interference task at the beginning and the end of the learning process. To do this, we compared the first and the last learning phase in 10-year-old children (this analysis was not performed for the 7-year-old group because in this group there was no performance difference between the single- and dual-task conditions in the first learning phase). In the 10-year-old group, the Learning Condition \times Learning Phase interaction was significant for accuracy, $F(1,71) = 8.39$, $p = .005$, $\eta^2_p = .11$, but not for completion time, $F(1,71) = 3.08$, $p = .08$, $\eta^2_p = .04$. The auditory interference task thus seemed to affect the performance of the 10-year-old children less (in error terms) at the end of the learning process than at the beginning of learning.

Third, we tested the hypothesis that during the first learning phase (trials 1 and 2), the performance of the 7- and 10-year-old children in the dual-task condition (when implicit processes prevailed) should be equivalent, and poorer for younger than older children in the single-task condition (because older children could benefit from their ability to use controlled attentional resources—i.e., executive functions—in this condition). To do so, we first compared the performance of the two age groups during the first learning phase in the dual-task condition. The results confirmed our hypothesis, showing no significant difference for either errors, $F(1,71) = 0.15$, $p = .70$, $\eta^2_p = .002$, or completion time, $F(1,71) = 3.15$, $p = .08$, $\eta^2_p = .04$. This result shows that, in the dual-task condition, 10-year-olds performed at the same level as 7-year-olds. This was not the case for the single-task condition, where the results showed an effect of age group on performance (completion time: $F(1,71) = 21.62$, $p < .001$, $\eta^2_p = .23$, and errors: $F(1,71) = 16.99$, $p < .001$, $\eta^2_p = .19$), indicating that 7-year-old children performed significantly worse than 10-year-old children.

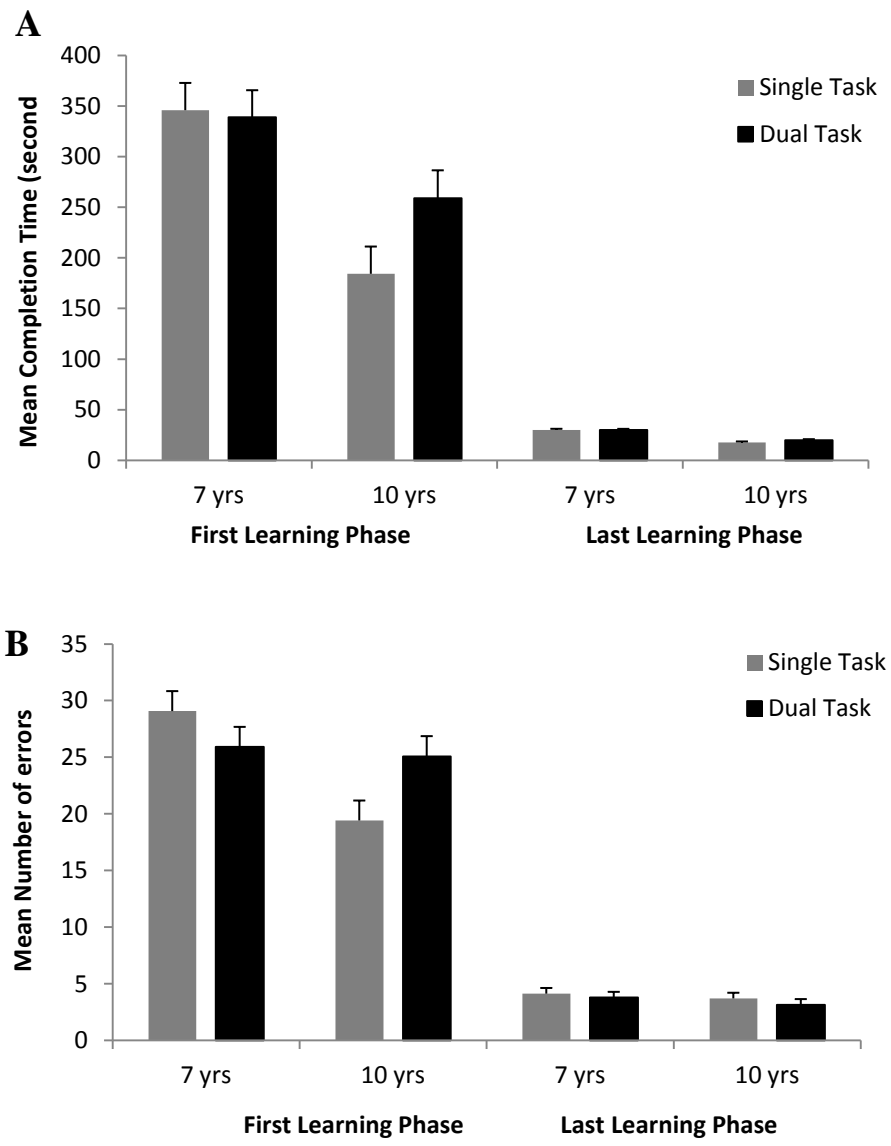


Figure 9. Mean completion time (A) and mean number of errors (B) for the first and last learning phases of the mirror tracing task by age group (7 and 10 years old) as a function of learning condition (single-versus dual-task). Error bars represent standard errors.

Auditory interference task

During the beginning of the learning phase, while 10-year-olds gave more responses during the interference task than 7-year-olds ($M = 72.78\%$; $M = 64.83\%$), this difference was not significant, as shown by the absence of an age group effect, $F(1, 35) = 2.49$, $p = .12$, $\eta^2_p = .07$. The main effect of learning phase was significant, $F(1, 35) = 119.27$, $p < .001$, $\eta^2_p = .77$: the children gave more responses at the end than at the beginning of the procedural learning task (for 7-year-olds: 97.75%; for 10-year-olds: 99.49%). No significant interaction was revealed, $F(1, 35) = 0.88$, $p = .35$, $\eta^2_p = .02$. Pearson's correlation showed no relationship between performance in the auditory interference task and performance in the procedural task under secondary task load ($p > .10$). Therefore, differences in the allocation of attentional resources to the secondary task do not account for the performance differences found in the mirror tracing task.

Learning curve (trials 3 to 18)

Figure 10 A and B show the untransformed completion times for all trials. The analysis, which focused on trials 3 to 18, revealed a main effect of age group on completion time ($F(1, 71) = 76.43$, $p < .001$, $\eta^2_p = .52$, and number of errors, $F(1, 71) = 7.41$, $p = .008$, $\eta^2_p = .09$). Planned comparisons revealed that 7-year-old children were slower and committed significantly more errors than 10-year-old children. Interestingly, there was no significant effect of learning condition (time: $F(1,71) = 0.22$, $p = .64$, $\eta^2_p = .003$; errors: $F(1,71) = 0.00$, $p = .94$, $\eta^2_p < .001$). This result indicates that when the mirror tracing task was performed without the interference task, 10-year-old children who were in the dual-task condition during the first two trials performed at the same level as 10-year-olds in the single-task condition. A main effect of trial was found for both completion time and errors, $F(5.58, 396.31) = 342.52$, $p < .001$, $\eta^2_p = .83$; $F(7.01, 498.11) = 122.04$, $p < .001$, $\eta^2_p = .63$, respectively. The results showed that, in the two age groups, completion time and errors in the mirror tracing task improved with each successive trial. No interaction was significant ($p > .10$) for completion time, indicating that all children learned the procedural skill similarly regardless of their age and the learning condition. For errors, the significant Age Group x Trials interaction, $F(7.01,$

498.11) = 2.65, $p = .01$, $\eta^2_p = .04$, revealed that the decrease in the number of errors with later trials was greater in the younger children than in 10-year-olds.

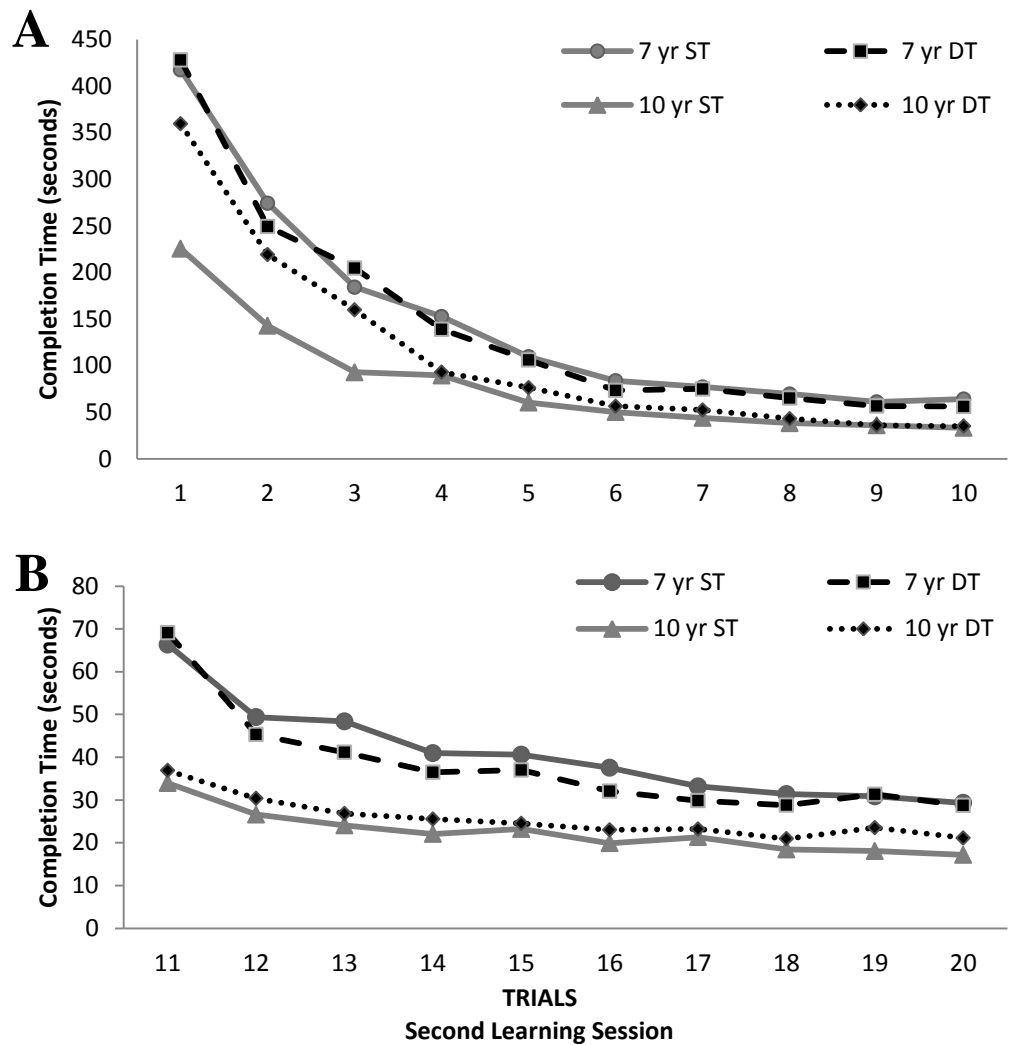


Figure 10. Completion time for the first (A) and second sessions (B) of the mirror tracing task by age group (7 and 10 years old) as a function of learning condition: single-task (ST) versus dual-task (DT).

DISCUSSION

The aim of the present study was to better understand the processes involved during procedural learning in children. More specifically, our aim was to test the assumption that the mechanisms involved during learning differ according to the training stage and the state of development of cognitive capacities. To do this, we compared the effect of an auditory interference task on performance in a mirror tracing task) in two age groups of children: 7-year-olds (whose explicit learning mechanisms are still developing) and 10-year-olds (at a more mature developmental stage). The interference task was administered at the beginning and the end of learning the mirror tracing task.

Our analyses supported our three hypotheses. First, the impact of the dual task differed between age groups during the first learning phase: 10-year-old children were more affected by the interference task than 7-year-old children (this is mainly marked for qualitative performance). Specifically, the performance of 10-year-old children was degraded by the imposition of a secondary task, whereas no difference between learning conditions was revealed in the 7-year-old group. Second, the results showed that, in the 10-year-old group, the interference effect (as revealed by the number of errors) was greater at the beginning than at the end of the learning process. However, this result should be interpreted with caution given that this effect was not present for the time variable (the interaction was not significant, i.e. the interference effect was still present at the end of learning). In light of these results, we cannot exclude the possibility that the 10-year-old children did not fully automate the ability; it could be that at the end of the second learning session their mirror tracing performance was still influenced by controlled processes. According to Beaunieux et al. (2009), a large number of trials is necessary to reach the automation phase. In their study, they included 40 trials, while only 20 trials were administered in our study; this could contribute to explain why the interaction between learning condition and learning phase was not significant for completion time. Third, our results showed that, during the first learning phase of the dual-task condition (when implicit memory processes prevailed), the performance of 10-year-old children in terms of both time and errors was close to that of 7-year-old children; on the other hand, in the single-task condition (in which explicit processes predominated in older children), 7-year-old children performed significantly worse than 10-year-old children. This is concordant with developmental

studies which argue that explicit processes mature with age (Waber et al., 2007), while automatic, implicit processes are invariant with age (Meulemans et al., 1998). Our results are in line with those of a previous study in younger and older adults which reported age-related differences in procedural performance when performance relied on explicit processes, whereas age effects disappeared when learning was supported by implicit memory processes (Chauvel et al., 2012).

Overall, our results demonstrate that the mechanisms underlying performance in the mirror tracing task differ between age groups. At first glance, the 10-year-old children's performance is congruent with a top-down conception of procedural learning (i.e., the first stages of the learning process are sustained by high-level explicit mechanisms, notably working memory), whereas the results obtained in the 7-year-old group support the bottom-up conception of skill learning (i.e., performance in the first learning stages can be sustained by implicit mechanisms; e.g., Sun et al., 2001). Our results might be considered as consistent with theoretical proposals of two distinct learning systems (Maxwell et al., 2003; Sun et al., 2001; Willingham, 1998). For instance, Willingham (as part of COBALT, control-based learning theory) postulated that a motor task can be performed in either a conscious or an unconscious mode. In the unconscious mode, subjects are aware of the objective (i.e., the goal to reach), but not of how to perform the task. In the conscious mode, which requires more attention than the unconscious mode, subjects are conscious of the perceptuomotor demands of the task (e.g., the transformation in a perceptuomotor adaptation task such as mirror drawing) and use strategic processes which lead to more accurate performance. The results obtained by our 10-year-old group in the single-task condition are consistent with this view: they used explicit mechanisms to perform the task, allowing them to achieve better performance levels (mainly marked in qualitative terms) than the 10-year-old children in the dual-task condition (who were prevented from using their controlled cognitive processes by the secondary task). In other words, in 10-year-olds, the early learning stage is cognitively demanding (or working memory-dependent, as suggested by Maxwell et al., 2003), as attested by their sensitivity to the auditory interference task. Consistent with the literature on the development of executive processes throughout childhood (e.g., Brocki & Bohlin, 2004; Jonkman, 2006), strategy formation could be more difficult for young children. Therefore, the 7-year-old children's performance is

likely to be mainly supported by the unconscious (or working memory-independent, according to Maxwell et al.) mode, as attested by their lesser sensitivity to the interference auditory task.

However, an alternative explanation for the absence of a learning condition effect in 7-year-olds should also be considered: this result could be linked to the interference task itself, or to how subjects performed this secondary task (for instance, the children could have focused on the main task at the expense of the interfering task). To rule out this possibility, we ensured that all children performed the auditory interference task equally: no significant age difference was found on the auditory task. Moreover, correlational analyses showed that differences between children in the allocation of attentional resources to the secondary task did not account for the performance differences reported in the mirror tracing task. Therefore, the lack of difference between the single- and dual-task conditions in younger children cannot be attributed to a lack of cognitive investment in the interference task. On the other hand, the impact of the secondary task on 10-year-olds' performance proves that the interference task used in this study was complex enough to occupy cognitive resources. However, in the two age groups, children gave significantly more responses at the end than at the beginning of the procedural learning task. This indicates that performing the main task (the mirror tracing task) required less cognitive resources at the end than at the beginning of the learning process. While these results are consistent with a top-down conception of skill learning (i.e. the skill becomes progressively more automatic and thus ceases to be affected by a concurrent secondary task), they raise questions concerning the 7-year-old group: if performance of our younger children was supported by implicit/automatic mechanisms from the outset, why did they give more answers in the secondary task at the end than at the beginning of learning? Actually, as suggested by several authors (Gentile, 1998; Sun et al., 2005; Willingham & Goedert-Eschmann, 1999), it could be hypothesized that procedural performance is not supported exclusively by implicit rather than explicit mechanisms, but rather that, in most situations, both types of learning act in parallel and the relative contribution of each varies according to, for instance, task parameters (i.e., the introduction of an interfering task forces the transition to more implicit learning; Sun et al., 2005), but also (as suggested by our findings) the learner's cognitive abilities. These considerations lead us to adopt a more

nuanced position regarding the interpretation of our 7-year-old group. While our results confirm that 7-year-old children used mainly implicit mechanisms to accomplish the task, this does not rule out the possibility that explicit processes, and more generally attentional processes, could also intervene early in performance; this could explain the differences obtained in the auditory task at the beginning and end of the mirror tracing task.

Finally, the analysis performed on the learning curve showed that, despite initial differences in performance due to age and learning condition, all age groups benefited similarly from practice: although the performance of young children was poorer on a range of executive tasks (which are known to facilitate learning of the mirror tracing task; see Rouleau, Salmon, et al., 2002), they nevertheless learned the task, and no difference in the rate of acquisition was revealed between the age groups. In other words, our results demonstrate that the two age groups were able to achieve similar levels of learning. These data support our previous results (Lejeune, Catale, Schmitz, et al., 2013), suggesting that the involvement of explicit mechanisms is not a “necessary condition” for motor skill learning to occur, as suggested by several authors (Maxwell et al., 2003; Sun et al., 2001). But the observation of similar learning curves between all groups leads us to go further in our interpretation of the role played by explicit mechanisms during the learning process. Actually, we have shown that explicit mechanisms influenced significantly our 10-year-old subjects’ performance; but the learning curves lead us to suggest the hypothesis that these mechanisms would not influence the learning process itself. Although further researches are necessary to confirm this assumption (for instance, in which interference task would be introduced throughout the task), our result suggests that the role of explicit mechanisms in perceptuomotor procedural learning might be not to sustain the learning process, but instead to allow the subject to better control his/her performance (for instance, by limiting the number of errors) on a task that has not been automatized.

CONCLUSION

The experiment reported here contributes to improving our understanding of the processes involved in procedural learning in children. Our results are in agreement with the hypothesis that the mechanisms involved in the first steps of procedural learning

can differ according to the learner's cognitive resources or task parameters (Sun et al., 2001). The performance of younger children (who show little capacity to use explicit strategies) in the early learning phase of the mirror tracing task was mainly supported by implicit mechanisms, as attested by their lesser sensitivity to the interference auditory task. In contrast, 10-year-old children made use of explicit mechanisms to perform the task, which permitted them to achieve better performance levels at the beginning of the learning process (unlike in the dual-task condition, which limited the use of such controlled cognitive processes). Interestingly, all groups (age and learning condition) benefited similarly from practice: no difference in the rate of acquisition was revealed. The use of explicit mechanisms early in the mirror tracing task may not have impact on the learning curve. Taken together, these results challenge Anderson's (1982) ACT model as well as other top-down conceptions of procedural learning and suggest that perceptuomotor skill learning in children may not depend on the use of explicit processes. The role of these processes (so long as they are sufficiently developed) may be limited to control and to facilitating performance during the initial stages of procedural learning.

**INTACT PROCEDURAL MOTOR
SEQUENCE LEARNING IN
DEVELOPMENTAL
COORDINATION DISORDER**

Caroline Lejeune, Corinne Catale, Sylvie Willems, and Thierry Meulemans

Research in Developmental Disabilities, 34, 1974-1981

INTRODUCTION

Developmental Coordination Disorder (DCD) is a developmental disorder mainly characterized by marked impairments in motor skills, in the absence of neurological or intellectual dysfunction (APA, 2000). Children with the disorder typically have problems acquiring and performing daily activities that require motor coordination, such as handwriting, drawing, eating with cutlery, dressing, tying shoelaces, and sports (throwing a ball, riding a bike, jumping, etc.) (Zwicker et al., 2012). These motor difficulties may lead to a high level of dependence on adults and cause the children affective and social discomfort. The mechanisms underlying this disorder, which can have a severe impact on children's daily lives, are still unknown.

One of the hypotheses relevant to DCD that has received some consideration is the idea of a dysfunction in the brain circuits (such as cortico-striatal and cortico-cerebellar circuits) that sustain procedural learning, i.e. the learning and automation of motor skills. This hypothesis has been initially proposed by Nicolson and Fawcett (2007). More specifically, these authors suggested a common impairment procedural learning system in developmental disorders which could explain especially the frequent comorbidity between these disorders. While some studies have reported results which support the presence of a procedural learning deficit in children with dyslexia (Vicari et al., 2005), specific language impairment (Lum, Conti-Ramsden, Page, & Ullman, 2012), and attention deficit hyperactivity disorder (Barnes, Howard, Howard, Kenealy, & Vaidya, 2010), contrasting results have also been obtained, showing for instance that children with specific language impairment are able to learn a new procedural skill as quickly and accurately as children without any developmental disorder (e.g., Gabriel et al., 2011).

In DCD, the hypothesis of a procedural learning deficit seems particularly relevant; indeed, several authors have highlighted problems with motor skill acquisition in DCD (e.g., Goodgold-Edwards & Cermak, 1990). Clinically, DCD children have been observed to experience difficulties automatizing their gestures: for instance, in contrast with peers, movements to tie shoes continue to require particular attention, even after a great deal of practice. In support of this procedural learning deficit hypothesis, some studies have showed that dysfunction of cerebellum and basal ganglia might be

involved in the pathogenesis of DCD (Brookes et al., 2007; Cherng et al., 2009; Marien et al., 2010; Nicolson & Fawcett, 2007; Piek & Dyck, 2004; Zwicker et al., 2011). For instance, Zwicker et al. (2011) explored brain activity during motor procedural learning (trail-tracing task using a joystick) in 7 children with DCD and 7 matched controls. DCD children showed significantly less activation than their peers in the cerebellar-parietal and cerebellar-prefrontal circuits. Interestingly, after three days of practice on this trail-tracing task, in children with DCD, contrary to control children, there was no improvement in tracing accuracy. Several behavioral studies have also demonstrated cerebellar dysfunction among children with DCD (Geuze, 2005b). For instance, difficulties in motor adaptation learning have been demonstrated in DCD (e.g., Kagerer et al., 2006).

Procedural learning is usually defined as a process in which new visuomotor, perceptual, or cognitive skills are acquired through repetitive training (Cohen & Squire, 1980; Willingham, 1998). An experimental paradigm frequently used to explore procedural learning is the serial reaction time paradigm (SRT; Nissen & Bullemer, 1987). In this task, subjects are asked to respond as quickly and accurately as possible to stimuli appearing at different locations on a computer screen by pressing corresponding keys on the keyboard; participants are not told that the stream of stimuli corresponds to a repeating sequence. Learning is demonstrated by improvement in the speed of response across trials and, more specifically, by the difference in response latency between a random block of stimuli and the repeating sequence block, indicating clearly that skill learning was sequence-specific. Neuroimaging studies have demonstrated that procedural sequence learning is supported by the basal ganglia and the cerebellum (e.g., Jenkins, Brooks, Nixon, Frackowiak, & Passingham, 1994), and the SRT paradigm has been widely used to explore memory abilities in various neurological pathologies characterized by impairments in these regions, such as Parkinson's disease (e.g., Helmuth, Mayr, & Daum, 2000). In children, the SRT task has also been used to explore procedural learning in developmental disorders (e.g., Lum et al., 2012; Vicari et al., 2005)

To our knowledge, only two studies have investigated the motor difficulties of children with DCD with the SRT paradigm. First, Wilson, Maruff, and Lum (2003) explored motor

sequence learning with a 10-element long sequence SRT task and noted normal results in 10 children with DCD. Unfortunately, the interpretation of this finding is problematic due to some methodological flaws, such as the absence of structural equivalence between random and repeated sequence blocks. Recently, Gheysen, Van Waelvelde and Fias (2011) used the sequence of Wilson et al. to explore SRT performance in a larger sample of children (18 DCD and 20 control children). These authors matched the random block to the sequence block (i.e., the four locations appeared with the same frequency in the random and sequence blocks) and added another sequence block (administered after the random block) in order to control for the effects of fatigue. In this way, they assured that the increase in reaction times observed for the random block was due to the impossibility of using sequence-specific knowledge with these randomly presented items. Interestingly, in this study, implicit sequence learning seemed to be impaired in children with DCD. However, one question remains unanswered: did these results reflect a deficit in procedural learning as such, or rather a motor deficit? Subjects had to use a response box to press the key corresponding to the target: the possibility remains that the DCD children's impaired performance on the SRT task could have been caused by the perceptuomotor difficulties that characterize DCD. As described by Gabriel et al. (2012), performance on an SRT task can be affected by deficits in manual dexterity and/or by difficulties matching the location of the target on the screen to the corresponding key. These cognitive and perceptuomotor constraints may affect specific-sequence learning. Indeed, considering the deficits in eye-hand coordination and in sensorimotor and visuospatial processing (Savelsbergh, Whiting, Pijpers, & van Santvoord, 1993; Wilson & McKenzie, 1998), but also in working memory (Alloway, Rajendran, & Archibald, 2009) present in DCD, it might be hypothesized that using a keyboard or a response box is too complex for DCD children.

In this context, the aim of our study was to explore motor sequence learning in children with DCD in an adaptation of the SRT task that reduces (or even eliminates) the cognitive and perceptuomotor constraints associated with the classical SRT task. For this purpose, we used a modified version of the SRT task devised by Gabriel et al. (2012), in which the standard keyboard is replaced by a touch screen. With the touch screen, the motor and cognitive constraints of the task are minimized, because subjects can simply use their dominant hand to touch the target directly on the screen. In

addition, a quadrant presentation was employed; with this arrangement the locations can be better separated into large spatial domains (Thomas & Nelson, 2001). On the basis of the procedural deficit hypothesis, we predicted that even with the touch screen as response mode, children with DCD should present difficulties in sequence-specific learning relative to normal controls. Conversely, the observation that the performance levels of children with DCD on the touch screen-based SRT task are similar to those of control children would challenge the procedural deficit hypothesis on the difficulties of DCD children in learning new motor skills.

METHOD

Participants

Thirty-four children aged 6 to 12 years (17 children with DCD and 17 control children matched based on chronological age, gender, mother's education level and verbal IQ score) participated in the study. Descriptive information regarding the two groups is presented in Table 3. All children had a verbal IQ score of more than 85 (based on the Verbal Comprehension Index from WISC-IV, Wechsler, 2005). The parents were asked to complete an anamnestic questionnaire to ensure that all children were born after a normal gestation period (> 36 weeks), without any obstetric complications, and were free of any psychiatric or neurological disorders. Moreover, control children presented neither motor impairments nor other learning impairments. Informed consent was obtained from the parents of all participating children.

Children from the control group were recruited in mainstream primary schools in the French-speaking part of Belgium. Children with DCD were recruited from special schools and occupational therapists in the French-speaking part of Belgium. To be included in the study, children had to meet the criteria of the Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (2000) for DCD. Motor ability was tested using the French version of the Movement Assessment Battery for Children (M-ABC; Soppelsa & Albaret, 2004). Children with M-ABC total scores below the 15th percentile were classified as having DCD (criterion A). The majority of children (13 out of 17) with DCD scored at or lower than the 5th percentile on the M-ABC. These deficits interfered with academic achievement or activities of daily living, as indicated by a clinically significant score on the M-ABC Checklist (criterion B). This scale was completed by the parents, who were

asked to evaluate their children's motor abilities. None had other medical, neurological (criterion C) or intellectual (criterion D) difficulties. Parents also completed the Conners Parents Rating Scale, a 48-item questionnaire (Dugas, Albert, Halfon, & Nedey-Sayag, 1987) that screens for attention-deficit/hyperactivity disorder (ADHD). None of the children with DCD presented scores above the cutoff score on the hyperactivity and impulsivity scale from Goyette, Conners, and Ulrich (1978). Furthermore, two computerized attention tasks assessing inhibition and flexibility (the Simon inhibition task adapted for children by Catale et al., 2011; the flexibility task from the TAP battery, Zimmermann & Fimm, 1994) and a digit span test (WISC-IV, Wechsler, 2005) were administered to all children (results on the executive tasks are presented in Table 3).

There was no group difference for reaction times and correct responses on the inhibition and flexibility tasks ($p > .05$). However, children with DCD presented a lower backward digit span than control children (no difference was found in forward digit span).

Table 3

Basic demographic data, verbal IQ scores, and executive performance in both groups

| | DCD (n = 17) | | Control (n = 17) | | t(32) | p |
|---------------------------------------|--------------|--------|------------------|--------|-------|-----|
| | M | SD | M | SD | | |
| Gender (male/female) | 11/6 | | 11/6 | | | |
| Age (years) | 9.12 | 1.66 | 9.08 | 1.62 | .07 | .94 |
| Mother's education level ^a | | | | | 2.93 | .40 |
| VCI (WISC-IV) | 111.94 | 10.36 | 109.29 | 12.49 | .90 | .37 |
| Inhibition task (reaction times) | 875.97 | 203.93 | 799.68 | 135.14 | 1.29 | .21 |
| Inhibition task (correct responses) | 88.68 | 9.48 | 92.35 | 7.58 | -1.25 | .22 |
| Flexibility task (reaction times) | 1268.38 | 287.23 | 1187.00 | 236.72 | .90 | .37 |
| Flexibility task (correct responses) | 88.35 | 7.01 | 91.88 | 5.41 | -1.64 | .11 |
| Forward digit span | 4.94 | 0.90 | 5.29 | 0.69 | -1.29 | .21 |
| Backward digit span | 3.23 | 0.66 | 3.82 | 0.64 | -2.64 | .01 |

Note. DCD, children with developmental coordination disorder; M, mean; SD, standard deviation; VCI, Verbal Comprehension Index; WISC-IV, Wechsler Intelligence Scale for Children

^a Mother's education level: Education level was rated for each child from 1 to 5: levels ranged from "primary education" to "higher education"; χ^2 test was used for analysis

Material

Serial Reaction Time (SRT) task

Participants were presented with the modified version of the SRT task developed by Gabriel et al. (2012) where the standard keyboard was replaced with a touch screen in order to reduce the impact of the DCD group's perceptuomotor coordination difficulties. The touch screen was placed on the laptop screen and was the same size as the monitor (15"). The laptop screen was open at a 180° angle to the keyboard in order to ensure the most comfortable position possible for the child. The E-Prime software (version 1.1) was used for stimulus presentation and data recording.

In order to keep the children motivated and focused on the task, the test was presented as a game in which a character appears in one of the four windows of a castle

(corresponding to the four quadrants, see below). The child's task was to "liberate" the character as fast as possible by catching it (using his/her dominant hand) with a "magic wand" (pen stylus). The distance between the horizontal and vertical windows was respectively 25 and 14.5 centimetres. The character disappeared once the children had touched the relevant area of the screen with the stylus, or after a maximum time of 4000 ms. The next target appeared after a 250 ms response-stimulus interval.

The experiment included 8 blocks of a four-choice RT task. Participants were given a break after each block. An ambiguous 10-item sequence was employed for this study: 2-4-1-3-4-2-1-4-3-1. Each block consisted of a 10-element-long sequence repeated 8 times (for a total of 80 trials per block). As suggested by Thomas and Nelson (2001), the screen was divided into four large spatial domains, and each stimulus in the sequence was located in a quadrant of the screen (rather than following the linear presentation classically used in SRT tasks). Thus, on each trial, a target appeared at one of the four possible locations (upper left, upper right, lower left, lower right). The sequence was repeated from Block 1 to Block 6, and for the last block (Block 8). This sequence was chosen because each transition between consecutive locations (first-order transition) appears only once within the sequence, and because it did not contain reversals (i.e., ABA), which are known to be especially salient (Reed & Johnson, 1994). In the pseudorandom block (Block 7), the location of the target was randomly determined, except that two consecutive characters could not appear in the same position, and that the four locations appeared with the same frequency as in the repeating sequence in order for the distribution of location frequencies to be the same as in the learning sequence (1 and 4: 30%; and 2 and 3: 20%). In addition, the frequency of first-order transitions (e.g., 2 could be followed by 1 and by 4, and never by 3) was matched between the learning and pseudorandom blocks. Median reaction times (RTs) and accuracy (percentage of correct responses) were computed for each block.

The SRT task was administered in one session. All children were tested individually in a quiet room and seated at approximately 50 cm from the screen. The participants were not informed of the presence of a sequence.

Explicit awareness test

After the SRT task, children's explicit awareness of the sequence was tested. Subjects were informed that the locations of the characters followed a pattern, and they were administered the free-generation task which consisted in generating a series of trials similar to the sequences they had previously seen (they were asked to avoid repetitions). On this task, each time the child touched the screen, there was a beep informing them that the answer had been recorded. The test stopped after 30 trials. The number of correct triplets was identified as the generation score.

STATISTICAL METHODS

An alpha level of .05 was used for all statistical comparisons. Performance during the learning phase was assessed using a repeated measure ANOVA with group (control *versus* DCD children) as a between-subjects variable and block as a repeated measure. Greenhouse–Geisser corrections are reported when sphericity was violated.

To measure the degree of awareness of the repeated sequence, an independent t-test was performed first to compare the generation score with chance in the DCD group, and second to compare the generation scores of the two groups. Finally, Spearman's rank correlation test was conducted to evaluate the relation between explicit knowledge of the sequence and the sequence-specific learning effect.

RESULTS

Serial Reaction Time (SRT)

Accuracy scores during the SRT task were very high in both groups: 97.06 % (SD=2.49) for DCD children and 97.68% (SD=2.43) for control children. The difference between groups was not significant, $t(32) = -0.74$ $p = .47$, showing that children with DCD did not make more errors than control children. Because these accuracy scores were very high, they were not analyzed further.

The median reaction time (RT) for each block was presented in Figure 11 for the two groups. First, we performed an ANOVA on RTs with group (control *versus* DCD children) as a between-subjects variable, and block (6 levels) as a repeated measure. Results showed a significant effect of block, $F(5, 160) = 13.53$, $p < .001$, $\eta^2_p = .30$, confirming the RT improvement from Block 1 to Block 6. Interestingly, there was no effect of group, $F(1, 32) = 2.13$, $p = .15$, $\eta^2_p = .06$, and no significant interaction, $F(5, 160) = 0.78$, $p = .57$, $\eta^2_p = .02$, indicating that the DCD group responded as quickly as control participants and that RT improvement was similar in the two groups.

Because the improvement between Block 1 and Block 6 could just be due to a general practice effect, in order to show that participants learned sequence-specific information, we compared their performance on the last repeating-sequence block (Block 6) with their performance on the (pseudo) random block (Block 7). An ANOVA with block (Block 6 *versus* Block 7) as repeated measure and group (control *versus* DCD) as between-subjects variable showed a significant effect of block, $F(1, 32) = 27.00$, $p < .001$, $\eta^2_p = .46$, with Block 6 processed faster than Block 7 (pseudorandom block) in both groups. RTs in the two groups were similar, $F(1, 32) = 0.003$, $p = .96$, $\eta^2_p < .001$, and the Group \times Block interaction was not significant, $F(1, 32) = 1.79$, $p = .19$, $\eta^2_p = .05$, showing that sequence learning was globally similar in both groups.

Note that the time difference between Block 6 and Block 7 cannot be interpreted as an effect of fatigue: a comparison between Block 6 and Block 8 did not show any significant block effect, $F(1,32) = 1.34$, $p = .26$, $\eta^2_p = .04$, confirming that the RT increase observed in the pseudorandom block was due to sequence-specific learning. Moreover, there was no significant group or interaction effect, $F(1,32) = 0.93$, $p = .34$, $\eta^2_p = .03$, and $F(1,32) = 0.42$, $p = .52$, $\eta^2_p = .01$, respectively.

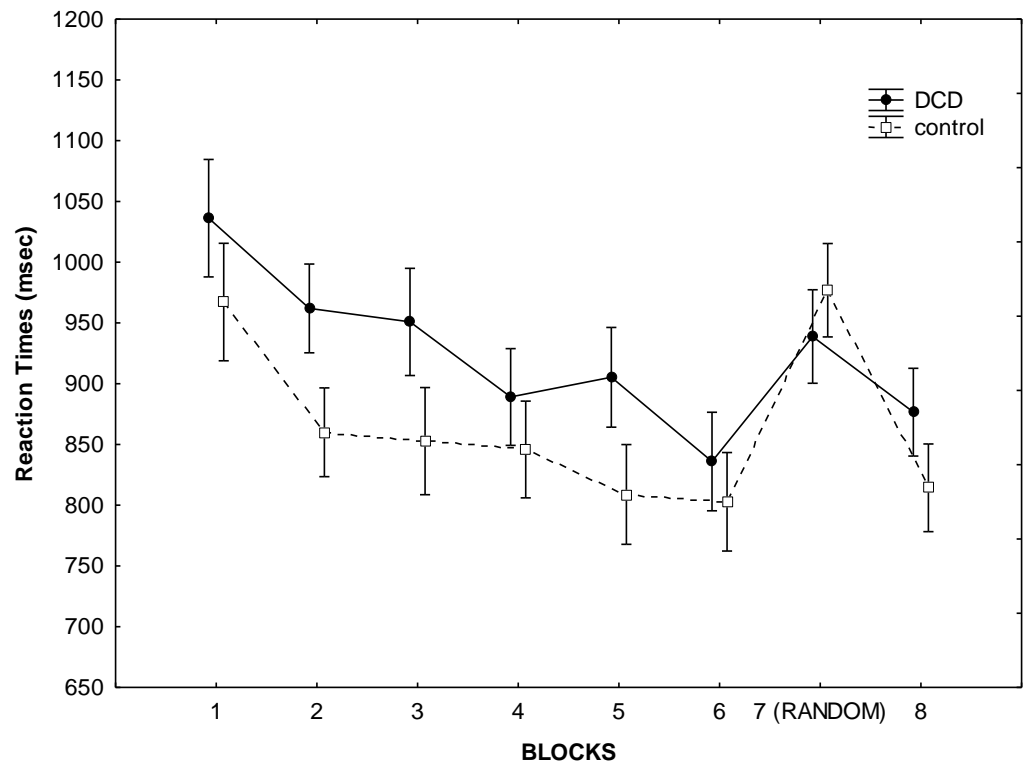


Figure 11. Learning patterns for children with DCD (circle) and control children (square). Data points indicate the mean of median reaction times for each block. Error bars represent standard errors.

Explicit awareness

To measure generation performance, the number of triplets consistent with the sequence was computed for both groups. Given that the generated sequence were 30 trials long, the maximum possible number of correct triplets was 28. The number of correct triplets was computed to obtain the generation score. The chance level was 7.77 (out of 28) [following the methodology of Gheysen et al. (2011), this was computed according to the following logic: with 4 locations, there are 36 possible triplets without repetition of location; with a 10-element sequence, 10 of these triplets are part of the repeated sequence; with 30 trials in the generation task and a maximum of 28 different

triplets, the chance level = $(28 \cdot 10) / 36 = 7.78$]. Children with DCD obtained a mean awareness score of 11.12 (SD = 5.54); control children obtained a mean score of 13.82 (SD = 6.15). A t-test showed that children had some awareness of the repeating sequence (the generation score differed significantly from chance, $p < .05$ for both groups), and a second t-test showed that this awareness was comparable between the two groups, $t(32) = 1.35$, $p = .18$. Note however that the degree of awareness suggested by these scores is very limited: full explicit knowledge of the sequence would have led to a score of 28. Although they differ significantly from chance, scores of 11.12 and 13.82 are actually very low.

Finally, there was no significant correlation between the generation score and the SRT learning index (calculated according to the equation $[\text{Block 7} - \text{Block 6}] / [\text{Block 6} + \text{Block 7}]$, Cherry & Stadler, 1995; Meulemans et al., 1998; Thomas & Nelson, 2001) for either the control or the DCD group ($p > .05$).

DISCUSSION

Despite the fact that children with DCD experience difficulties learning motor skills in everyday life, to date, and quite surprisingly, motor procedural learning in developmental coordination disorder has received very little attention. Such research on skill learning in DCD is needed to identify the precise cognitive mechanisms underlying the main difficulty in this disorder.

The purpose of the present study was thus to explore the possibility of a procedural learning deficit among children with DCD. This hypothesis has been suggested by several authors (Gheysen et al., 2011; Nicolson & Fawcett, 2007) and seemed to receive support from some studies which have shown that a dysfunction of brain structures (such as the cerebellum and basal ganglia) which are heavily involved in the acquisition of motor skills might be involved in the pathogenesis of DCD. More specifically, we compared the performance of children with and without DCD on a variant of the Serial Reaction Time task (Gabriel et al., 2012) that reduces the potential impact of perceptuomotor coordination difficulties on the SRT performance of children with DCD. The logic for this choice was that the deficits displayed by DCD children in the SRT task might be caused by motor and cognitive deficits associated with this disorder, and not by an inability to learn sequential information per se.

Our results showed that children with DCD responded as quickly as their peers in all blocks and that reaction time improvement from Block 1 to Block 6 was similar in the two groups. Likewise, accuracy scores on the SRT task were high and did not differ between groups. Contrary to procedural learning deficit hypothesis, DCD children's success at acquiring sequence-specific knowledge did not differ from that of control children (as attested by the difference in performance between Blocks 6 and the pseudorandom block which reflects our participants' ability to learn information specifically related to the sequence with which they were confronted). After the learning phase, a generation task (which measures the degree of awareness of the repeated sequence) indicated that the children's degree of awareness of the sequence was low but significant, and that it was similar between DCD and control groups. However, no relation was found between explicit knowledge of the sequence and the procedural learning index. Thus, although children had some awareness of the repeated sequence at the end of the learning phase, they did not use this knowledge to increase their performance on the SRT task. Apart from the fact that these results confirm that the degree of explicit knowledge was similar in the two groups, they also suggest that control children and children with DCD did not differ with respect to the learning strategies that they used on the SRT task; more specifically, they did not differ in their use of conscious strategies to perform the task.

Our finding, showing that children with DCD present the same degree of specific sequence learning as control children, challenges the procedural learning deficit hypothesis. Wilson et al. (2003) had already reached the same conclusion, but due to methodological flaws their results were subject to question (lack of structural equivalence between random and repeated sequence blocks). Recently, Gheysen et al. (2011) used the sequence of Wilson et al., while improving the methodology, and showed contrasting results: children with DCD failed to learn the visuo-motor sequence. In contrast with this study, we observed specific learning of sequential regularities, with our DCD children (as well as control children) presenting a significant RT increase between the sixth learning block and the pseudorandom block (Block 7). Moreover, a comparison between the sixth block and the last block did not show any significant difference, which shows that the difference between Block 6 and Block 7 cannot be interpreted as an effect of fatigue. We suggest that the differences between the two

studies are not related to an implicit sequence learning deficit in children with DCD *per se*, but rather to confounding variables resulting from methodological factors, notably the response mode required by the standard SRT paradigm. While in the standard SRT task the response involves using the index and middle fingers of both hands to press the key on a keyboard or a response box, in our study the motor response involves movements of the whole arm: participants had to touch the location on the screen where the target appeared. Thus, in the standard SRT task, children can be disadvantaged by the motor demands of the task. Furthermore, they have to keep the correspondence between the position of the target on the screen and the corresponding key on the response box in working memory. The tests used to confirm the diagnosis revealed that the children with DCD presented difficulties in motor abilities but also in working memory in comparison to their peers. These deficits could affect their performance during the SRT task. The interest of the touch screen is that it requires less fine precision and visual-motor coordination (Gabriel et al., 2012). With this adaptation of the SRT task, and in contrast to Gheysen et al., our results show similar speed and accuracy in the two groups, confirming that the response mode involving the touch screen is appropriate for children with motor deficits such as those presented by children with DCD. Moreover, in the standard SRT task, both hands (dominant and non-dominant) are used, whereas responses are made only with the dominant hand in this modified version of the SRT task. Previous research has shown that DCD children perform poorly with the nonpreferred hand on a pointing task involving hemispheric transfer of information (Sigmundsson, Ingvaldsen, & Whiting, 1997; Sigmundsson & Whiting, 2002). These authors hypothesized that this could be due to a problem in the maturation of the corpus callosum in DCD. This deficit could thus impair performance on bimanual versions of the SRT task such as the one used by Gheysen et al. Previous studies have shown the key role of the corpus callosum in SRT tasks requiring a bimanual response (e.g., De Guise & Lassonde, 2001). De Guise and Lassonde showed that young children who presented callosal immaturity had difficulties learning the visuomotor sequence in the bimanual condition, but no difficulty in the unimanual condition. It would be interesting to further investigate this point by replicating this study in children with DCD.

Interestingly, Gheysen et al. (2011) administered a generation task to test whether the children had been able to develop explicit knowledge; they found that DCD and control children acquired some explicit knowledge of the repeating sequence and that the amount of such awareness was comparable in the two groups. On this basis, they suggested that the core of the problem in DCD during the SRT task could be a motor planning deficit rather than an inability to detect and learn the statistical regularities in sequential material. Our results are consistent with this view. In this context, performance during procedural sequence learning in DCD children appears to be sensitive to the motor demands of the task, and would be particularly affected when the response mode requires too much precision and motor coordination.

It is important to note that the difference between the results presented here and those of previous studies cannot be due to the characteristics of the sequence used, and specifically its statistical structure. Indeed, the sequence used by Gheysen et al. (2011; as well as by Wilson et al., 2003) comprised the triplet "141", a reversal, known to be a particularly salient combination of transitions (Reed & Johnson, 1994). In addition, in these studies the sequence could be learned by detecting some first-order transitions (for instance, the transition 1-3 appears once in the sequence, while the transition 1-4 appears twice and 1-2 never appears; participants could thus learn that 4 was the most likely response to follow 1), a problem that the authors tried to control in the random block (in which the four locations appeared with the same frequency as in the sequence blocks). However, they did not control the frequency of the first-order transitions in the random sequence. In our experiment, we chose a 10-item fixed ambiguous sequence (2-4-1-3-4-2-1-4-3-1) in which no first-order transition is repeated. In our pseudorandom block (Block 7), the four locations appeared with the same frequency as in the repeating sequence, and the frequency of first-order transitions (e.g., 2 is followed by 1 but never by 3) was matched between the learning and pseudorandom sequences. With these methodological precautions, differences between the learning and pseudorandom blocks cannot be explained by the frequency of the locations or first-order transitions (Karatekin et al., 2007). Therefore, the results we obtained with our DCD children reflect the learning of at least second-order associations (i.e., more than pairwise information).

Another methodological difference concerns the learning phase, which was longer in our study (more than 80 trials in comparison with the study of Gheysen et al., 2011), hence giving the participants more opportunity to learn the sequence.

Finally, although the response mode (touch screen *versus* response box) may have been the most influential determinant of our subjects' performance, other elements such as diagnostic criteria could also explain the discrepancy between the results presented here and those of previous studies. Gheysen et al. (2011) included children with scores below the 5th percentile in the M-ABC, whereas the 15th percentile was used in our study. It thus might have been that our children with DCD presented less severe motor deficits. However, this explanation can be rejected because only four of the children in our sample scored above the 5th percentile on the M-ABC (P 14.2, P 9.7, P 6.2, and P 5.1). Results regarding sequence learning remain the same when these four children are excluded from analyses. Furthermore, complementary analyses did not reveal any significant correlation between procedural learning index and the severity of motor difficulties (scores on the M-ABC).

CONCLUSION

To conclude, the results we obtained on sequence learning with the SRT task, which is known to be particularly sensitive to cerebellum and basal ganglia dysfunction (Doyon et al., 1997; Mayor-Dubois et al., 2010), suggest that procedural motor sequence learning is preserved in DCD. The important result of the present study is that motor specific-sequence learning can be observed in DCD children providing that the response mode does not create difficulties due to the cognitive and motor deficits that characterize this disorder. Although this study contributes to better understanding the extent of the motor deficits in DCD, it is important to highlight that our results cannot be generalized to other procedural skills, whose preservation in DCD children will have to be determined by future research. Indeed, procedural learning cannot be regarded as a homogeneous system; depending on the task and the type of learning (incidental *versus* intentional), the cognitive mechanisms and the cerebral areas involved can be different. Studies on procedural learning in DCD are still too limited, and research in this area should continue in the future in order to further our understanding of the exact

nature of the motor learning difficulties involved in DCD but also in order to guide the cognitive remediation. Notably, it would be interesting to explore these children's ability to learn more complex sequences (for example, containing probabilistic transitions) or other forms of procedural skills, such as mirror tracing (involving the adaption of movements to environmental changes), which is known to be particularly sensitive to cerebellar damage (Doyon et al., 2003).

**PROCEDURAL LEARNING,
CONSOLIDATION, AND
TRANSFER OF A NEW SKILL IN
DEVELOPMENTAL
COORDINATION DISORDER**

Caroline Lejeune, Murielle Wansard, and Thierry Meulemans

Soumis pour publication dans *Journal of the International Neuropsychological Society*

INTRODUCTION

A variety of motor skills are acquired progressively during childhood, such as using a computer mouse, tying shoelaces, writing, and riding a bicycle. Thanks to repetitive practice, these skills become automated, i.e., they can be performed without fatigue or conscious control. This process of gradual acquisition of new skills through repeated training is known as procedural learning (N. J. Cohen & Squire, 1980). Procedural learning is known to involve a series of successive stages (Doyon et al., 2003). During the first stage (“fast learning”), rapid improvement in performance can be observed within a single session. During the second phase (“slow learning”), further gains gradually appear across several training sessions until the attainment of automatization, in which the subject can perform the motor task automatically. Doyon et al. (2003) also described an intermediate stage of consolidation—i.e., increasing performance without practice following a latency period of more than 6 hours after the first training phase. Procedural learning is known to recruit a number of brain structures in adults, including the cortico-striatal and cortico-cerebellar systems (Doyon & Benali, 2005).

In the developmental literature, there is general agreement that procedural learning capacities are present early in childhood and that they play a critical role in the development of children’s cognitive capacities. The underlying system is generally regarded as a robust, but recent studies have suggested that some cerebral structures that are heavily involved in the acquisition and automatization of motor skills (such as the basal ganglia and cerebellum) could be especially vulnerable to developmental disorders (see, Bo & Lee, 2013). In recent years there has thus been a gradually increasing number of studies exploring the procedural learning capacities of children with dyslexia, specific learning impairment, and autism (e.g., Mostofsky et al., 2000; Nicolson et al., 2001; Ullman & Pierpont, 2005).

A procedural learning deficit has also been hypothesized in developmental coordination disorder (DCD; e.g., Nicolson & Fawcett, 2007), also known as developmental motor learning disability (see, Ahonen et al., 2004; Hands & Larkin, 2001). This developmental condition, which affects 6% of primary schoolchildren (Cermak & Larkin, 2001), is characterized by poor motor skills in the absence of neurological or intellectual

dysfunction (APA, 2000). It has been hypothesized that the poor motor coordination abilities of these children could be explained by abnormalities in the brain circuitry underlying procedural learning (e.g., Zwicker, Missiuna, Harris, & Boyd, 2011; for a review, see Bo & Lee, 2013). Clinically, DCD children experience difficulties with learning and automatizing daily motor activities. For instance, in contrast to their peers, writing movements continue to require particular attention even after a great deal of practice. This has led some authors to postulate a defect in one step of the motor learning process (Ahonen et al., 2004). However, while there is general agreement that children with DCD have motor learning difficulties (Hands & Larkin, 2001), empirical data supporting this view are still sparse.

Typically, procedural learning capacities are tested through two broad categories of tasks: sequence learning and perceptuomotor adaptation (Doyon et al., 2003). The first consists in learning (generally in an incidental condition) movements corresponding to a particular sequence, whereas motor adaptation refers to the learning of (and continuous adaptation to) new associations between vision and hand movements. Three studies have explored motor sequence learning in DCD using the serial reaction time paradigm (Nissen & Bullemer, 1987), in which participants implicitly learn a repeated sequence of stimuli. Although Gheysen, Van Waelvelde and Fias (2011) reported difficulties with this type of task in DCD children, the two other studies found preserved implicit learning abilities (Lejeune, Catale, Willems, et al., 2013; Wilson et al., 2003).

Contrary to the "implicit" nature of the learning processes involved in the serial reaction time (SRT) paradigm, adaptation tasks can be qualified as explicit, in that subjects know from the outset that they need to improve their performance. Typically, motor adaptation abilities have been studied through the mirror tracing paradigm (Gabrieli et al., 1993). In this experimental situation, subjects draw a figure with a pencil while seeing the action of their hand reflected in a mirror, or use a joystick or computer mouse to reach a target or trace the outline of a figure in "inverted mode"—i.e., one where the relation between the movements of the joystick and the movements of the cursor is rotated by 180° (Doyon et al., 2009; Lejeune, Catale, Schmitz, et al., 2013). Early in the learning process, adaptation to the inverted mode is facilitated by explicit

mechanisms such as inhibition (Brosseau et al., 2007; Lejeune, Catale, Schmitz, et al., 2013). Indeed, in this task, subjects need to inhibit an overlearned association between vision and motor behavior. Besides the intervention of explicit mechanisms, another fundamental aspect that distinguishes motor adaptation from sequence learning is the possibility of generalization. In sequence learning tasks (like the SRT task), subjects have to learn a particular sequence of movements, a form of specific structural knowledge that cannot be generalized to another situation (i.e., knowledge of a particular sequence in the SRT task does not facilitate the learning of another sequence). On the other hand, in motor adaptation tasks, subjects do not simply learn the specific movements that have to be performed during training; they acquire a form of perceptuo-motor skill that can be generalized to other situations—i.e., they can transfer their skill to a situation other than the one in which they trained (Seidler, 2007).

A number of studies have suggested that DCD children have difficulties with motor adaptation tasks similar to those observed in patients with cerebellar lesions (Brookes et al., 2007; Cantin et al., 2007; Kagerer et al., 2004; Kagerer et al., 2006). However, although these studies tell us about the ability of those with DCD to modify internal models of movement, they say nothing about procedural learning per se: i.e., they did not investigate the different stages of perceptuomotor skill learning. Consequently, the aim of the present study was to determine whether procedural learning, as assessed using a perceptuomotor adaptation task (the inverted mouse task; Lejeune, Catale, Schmitz, et al., 2013), is altered in developmental coordination disorder. More specifically, we wanted to test the stages of procedural learning that lead to automatization: (1) the first training session, during which fast improvement in performance was expected; (2) the consolidation step (the expected spontaneous improvement in performance between two sessions); (3) the second session during which a stabilization of performance was expected; (4) transfer of the skill to a new situation requiring greater precision. Our prediction was that, if DCD is characterized by a procedural learning deficit, we should find performance differences between DCD and control children in at least one of these stages of the procedural learning process. The links between the inverted mouse task and the severity of the motor problems were also analyzed in the DCD group.

METHOD

Participants

Seventeen children aged 6 to 12 years with Developmental Coordination Disorder, and 17 control children matched for age, gender, mother's education level, and verbal IQ participated in the experiment. The participants were the same as those who took part in an earlier study (Lejeune, Catale, Willems, et al., 2013). To be included in the study, the children had to meet the criteria of the Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (DSM-IV-TR) for DCD. First, children had scored at < 15th percentile on the Movement Assessment Battery for Children (M-ABC; Soppelsa & Albaret, 2004). As described in our previous study, the majority of the children with DCD (13 out of 17) scored at or lower than the 5th percentile on the M-ABC. These deficits interfere with academic achievement or activities of daily living, as indicated by a clinically significant score on the M-ABC checklist. None had other medical, neurological, or intellectual difficulties. No child with DCD had an associated Attention Deficit Hyperactivity Disorder (ADHD), based on the DSM-IV-TR criteria. Parents also completed the Conners Parents Rating Scale, a 48-item questionnaire (Dugas et al., 1987) that screens for attention-deficit/hyperactivity disorder (ADHD). None of the children with DCD presented scores above the cutoff score on the hyperactivity and impulsivity scale (Goyette et al., 1978). Furthermore, two computerized attention tasks assessing inhibition and flexibility (the Simon inhibition task adapted for children by Catale, Germain, and Meulemans, 2011; and the flexibility task from the TAP battery, Zimmermann & Fimm, 1994) and a digit span test (WISC-IV, Wechsler, 2005) were administered to all children. There was no group difference in reaction times or correct responses on the inhibition and flexibility tasks (all p s > .10). However, the children with DCD presented a lower mean backward digit span than control children (3.23 ± 0.66 for DCD children *versus* 3.82 ± 0.64 for control children; $p = .01$); no difference was found in forward digit span ($p = .21$).

All children had a verbal IQ score of more than 85 (based on the Verbal Comprehension Index from the WISC-IV (Wechsler, 2005)). The parents were asked to complete an anamnestic questionnaire to ensure that all children were born after a normal gestation period (> 36 weeks), without any obstetric complications, and were

free of any psychiatric or neurological disorders. Moreover, control children presented neither motor impairments nor other learning impairments. Informed consent was obtained from the parents of all participating children. The local research ethics committee approved the study, which was carried out in accordance with the guidelines of the Helsinki Declaration.

Measures

Perceptuomotor procedural learning task

The perceptuomotor adaptation procedural task used in this study is an original computerized test adapted from our previous study (the inverted mouse task: Lejeune et al., 2013). The equipment was composed of a laptop computer (15-inch screen and 1024 x 768-pixel resolution) and an optical wireless mouse (Trust MI-4150x). The task was programmed using the Toolbook software (version 9.0).

The children were told that they would be playing a computer game with cartoon characters. The task was designed to be attractive and to resemble a video game. On each trial, a stimulus (a cartoon character) appeared on the screen. The children were instructed to use the computer mouse, in inverted mode, with their dominant hand to “catch” different characters appearing on the screen with the cursor and put them in a basket located at the bottom of the screen as quickly as possible. In inverted mode, the relationship between the movements of the mouse and the movements of the cursor was reversed, i.e., rotated by 180°; when the mouse was moved to the left or down, the cursor would move to the right or up, and vice versa. To keep the children motivated and focused on the task, at the beginning of each block they were asked to select their preferred character out of five. After this choice was made, the task began and the child had to catch various characters and put them in the basket. The selected character appeared three times by block. Each time the child put the selected character in the basket, one point was scored.

Before starting the experiment, the children were asked to perform the task with the mouse in “normal” (i.e., non-inverted) mode: the total time to perform 8 trials (i.e., to put 8 characters in the basket) was recorded as a baseline speed measure. Immediately

after this initial control measure, the children were asked to perform the task using the inverted mouse.

Training phase. The training phase took place during two sessions, separated by a one-week delay. The task consisted in six blocks (3 blocks per session) of ten trials (i.e., putting 10 characters in the basket). Thus, the two learning sessions comprised 60 trials. For each block, the total time (in seconds) to put the 10 characters in the basket was recorded.

Consolidation phase. Given the one-week delay between the two training sessions, consolidation could be observed by comparing performance between Block 3, the last block in the first training session, and Block 4, the first block in the second session.

Transfer phase. We examined the transfer of the ability to use the inverted mouse to a different task. In this second task the children were asked to trace a triangle (formed by two black lines spaced 1.7 cm apart) using the inverted mouse with their dominant hand, as quickly as possible. The base of the triangle was 23.5 cm wide and its height was 11.5 cm. The children were instructed to follow the contour of the figure as quickly and accurately as possible in order to “catch” various toys appearing on the screen (inside the contour) without going outside the lines. If the participants moved the cursor outside the parallel lines, they had to reposition it at the place where it had veered off (indicated by a red square on the relevant line) in order to continue the task. This transfer task was performed twice: once before the training task (i.e., pretest), and once after (i.e., posttest). On each trial, the time (in seconds) to trace the entire figure and the number of errors (number of times the cursor veered outside the contour) were recorded by the computer.

RESULTS

Perceptuomotor procedural learning task

Logarithmic transformations were performed on the data in order to obtain normal distributions. As a first step, we assessed the two groups' ability to use the computer mouse (initial performance with the normally oriented mouse). We then investigated whether there was any group difference in procedural learning. To do so we analyzed (a) improvement in performance through the two sessions in the two groups, (b) consolidation (i.e., performance difference between Block 3, the last block in the first training session, and Block 4, the first block in the second session, one week later), and (c) the transfer of the learned ability to another task (tracing the triangle).

Initial performance with the mouse in its usual orientation

A t-test on completion time revealed no group difference in the ability to handle the mouse, $t(32) = 0.86$, $p = .39$ (Cohen's $d = 0.22$; J. Cohen, 1992). DCD children were not significantly slower at using the mouse than control children ($M_s = 17.63$ and 16.42 , respectively).

Assessment of training phase: Blocks 1 to 6

Participants' execution times are shown in Figure 12. To assess improvement in performance with practice in the two groups, an ANOVA with group as a between-subjects variable (control *versus* DCD) and block (3 blocks) and session (2 sessions) as repeated measures was performed on performance speed (total time in seconds). The results showed a significant effect of group, $F(1, 32) = 5.44$, $p = .03$, $\eta^2_p = .14$, block, $F(2, 64) = 16.49$, $p < .001$, $\eta^2_p = .34$, and session, $F(1, 32) = 85.69$, $p < .001$, $\eta^2_p = .73$. The Block \times Session interaction was significant, $F(2, 64) = 10.20$, $p < .001$, $\eta^2_p = .24$. No other interaction was significant ($p > .10$). Overall, these results show equivalent performance improvement during the first session (Blocks 1-3) in DCD and control children. No further significant gains across blocks were observed during the second session (Blocks 4-6) in either group. However, the group effect indicates that the performance of the DCD group was slower than that of the control group throughout the task.

Assessment of the consolidation phase: Blocks 3 to 4

Another important phase for our analysis is consolidation—i.e., the stage of motor learning after the initial fast learning phase wherein performance increases over a period without practice (Doyon et al., 2009). The comparison between Block 3 (session 1) and Block 4 (session 2) showed a significant effect of block, $F(1, 32) = 16.06, p < .001, \eta^2_p = .33$, but no Block \times Group interaction, $F(1, 32) = 0.97, p = .33, \eta^2_p = .03$. These results show that, without practice during the interval, the two groups' completion times improved significantly between the two training sessions, and that the improvement was similar in the two groups.

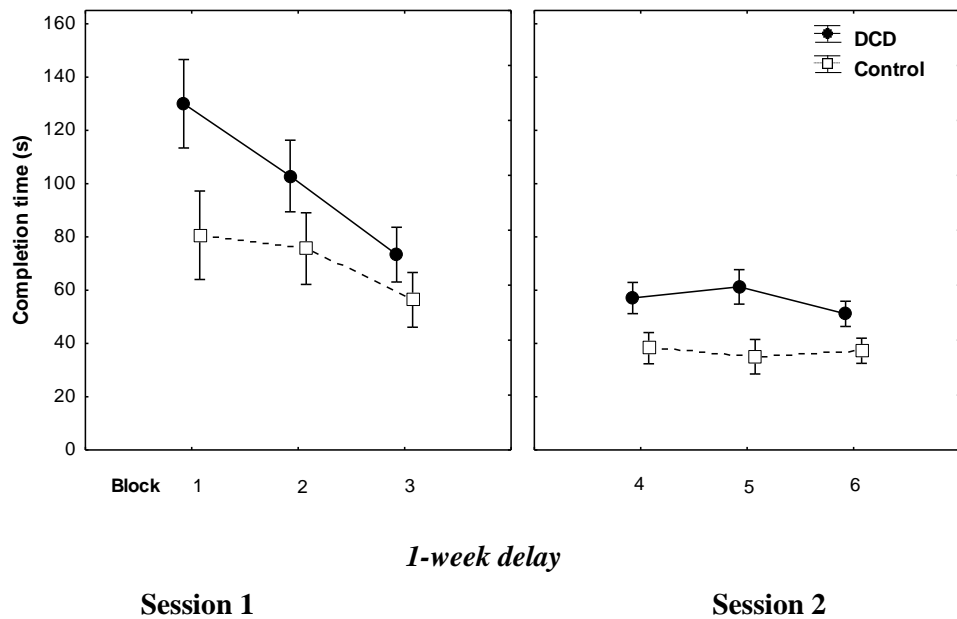


Figure 12. Learning patterns of children with DCD (circles) and control children (squares). Data points indicate mean completion time (in seconds) for each learning block. Error bars represent standard errors.

Assessment of transfer phase: triangle task

Transfer to a different task was tested by comparing performance (speed and error rate) between the pretest (before the training task) and the posttest (immediately after the training task). Results are illustrated in Figure 13. A repeated measures ANOVA showed main effects of group (completion time: $F(1,32) = 9.18, p = .004, \eta^2_p = .22$; errors: $F(1,32) = 17.93, p < .001, \eta^2_p = .36$) and test (completion time: $F(1,32) = 93.55, p < .001, \eta^2_p = .74$; errors: $F(1,32) = 64.12, p < .001, \eta^2_p = .67$). Posttest (transfer) performance was better than pretest performance in the two groups, with no significant interaction (completion time: $F(1,32) = 0.001, p = .97, \eta^2_p < .001$; errors: $F(1,32) = 0.03, p = .86, \eta^2_p = .001$).

The results of this analysis indicate a similar transfer effect in the two groups, but faster execution time in the control group than in the children with DCD.

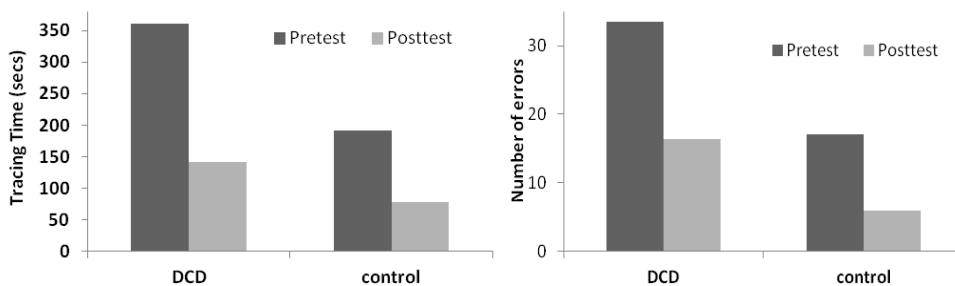


Figure 13. Performance (time and errors) during the transfer task performed before and after the learning phase (pretest versus posttest, respectively) for children with DCD and controls.

Relationship between procedural performance and motor deficits in the DCD group

We tested for a link between performance on the inverted mouse task and severity of motor problems (M-ABC score) in the DCD group using Pearson's correlation coefficient. No significant correlations were found between motor difficulties and inverted mouse performance (all p s $> .10$).

DISCUSSION

This study was aimed at investigating whether there are differences in procedural learning between DCD children and typically developing children using a perceptuomotor adaptation task. This form of procedural learning is thought to involve the cerebellum and basal ganglia (regions whose impairment has been associated with DCD; for a review see, Bo & Lee, 2013), but also other brain areas including frontal regions (Doyon et al., 2003). To date, very few studies have investigated new motor skill learning in DCD children. To the best of our knowledge, our study is the first to investigate the gradual process of skill acquisition (including three stages: fast learning, consolidation, and slow learning) in DCD children using a perceptuomotor adaptation task, along with transfer of the new ability (i.e., use of an inverted mouse) to a different task requiring more precision than the one on which the skill was trained. If DCD is characterized by a procedural learning deficit, we would expect to find performance differences between DCD and control children in at least one of these stages of the procedural learning process.

Although children with DCD were generally slower than control children, the results suggest that their perceptuomotor procedural learning abilities were preserved. Results from the first session showed a similar rapid decrease in execution time with practice in both DCD and control groups. The results on consolidation revealed that the two groups' performance improved to a similar extent across a one-week delay in the absence of any training. In the second session there were no further significant gains in performance in either group, suggesting that automatization was gradually occurring in the two groups (Doyon et al., 2003). Overall, children with DCD and control children showed similar patterns of improvement as the training blocks progressed, as evidenced by the lack of a significant interaction between group and block. Finally, results on the transfer of the ability to a different task were similar for the two groups.

Overall, these results, which show similar rates of learning, consolidation and transfer in DCD and control children, challenge the procedural learning deficit hypothesis on DCD. The performance improvement with practice observed in this study is consistent with the findings of several earlier experiments on procedural learning in children with DCD using, for instance, a motor sequence learning paradigm (Lejeune, Catale,

Willems, et al., 2013; Wilson et al., 2003), and a discrete movement task (that required the child to move the mouse pointer from a central point on the screen toward a target presented at one of eight possible peripheral locations; Missiuna, 1994). To date, the procedural learning deficit hypothesis in DCD has received support from only two studies, one using the sequence learning paradigm (Gheysen et al., 2011), and the other a complex motor task (hockey slap shot; Marchiori et al., 1987). Another study assessed motor procedural learning in 19 DCD children using a rotary pursuit task (Lord & Hulme, 1988). The analyses highlighted the inter-individual variability in the DCD group: although 10 of the DCD children improved their performance during training as well as controls, the others failed to develop the motor programs necessary to perform the task efficiently. However, direct comparison between all these studies is difficult, considering the variety of tasks used to test motor procedural learning.

Our results suggest that children with DCD learned the skill at about the same rate as the controls. However, the DCD children remained slower than their peers at the procedural task at every stage, and the asymptotic performance level that they reached was lower than that of the control children; in other words, the difficulties observed at the outset did not diminish with practice. Slow performance on motor tasks has often been reported in DCD. Indeed, several studies have found that children with DCD perform a motor task significantly more slowly than controls (e.g., Gheysen et al., 2011; Missiuna, 1994; Wilson et al., 2003). However, in a previous study using a setup designed to reduce the impact of the perceptuomotor coordination difficulties that characterize this disorder, we failed to find group differences in performance speed between DCD children and controls on another motor task (Lejeune, Catale, Willems, et al., 2013). In addition, Piek and Coleman-Carman (1995; see also Smits-Engelsman, Wilson, Westenberg, & Duysens, 2003) showed that slowness in DCD is not general, and might only emerge in complex conditions that require relatively high precision. In our experiment, we chose a task that was not too complex for the children, who simply have to “catch” different toys appearing on the screen and to put them in the basket at the bottom of the screen, as quickly as possible. This task demands little precision: the child can make large movements, which are not penalized. Initial performance with the mouse in its usual orientation showed that children with DCD can perform the task as quickly as control children, suggesting that the slowness observed in inverted mode

cannot be accounted for in terms of peripheral or general motor disabilities (e.g., weaker ability to use the computer mouse or slow overall processing speed). Similarly, the lack of significant correlation between the severity of motor problems in DCD (as measured by M-ABC) and performance speed on the inverted mouse task makes any direct relationship between motor symptoms and execution time on the procedural task unlikely.

A similar combination of preserved learning and degraded (i.e., slowed) performance has also been observed in other developmental disorders (e.g., in SLI; Mayor-Dubois et al., 2012) and among children with congenital cerebellar malformations (Edelstein et al., 2004). The causes of this slowness are presently unknown.

The inverted mouse task is a perceptuomotor adaptation task involving the modification of an overlearned association between vision and motor behavior. Executive functions have been shown to be involved in this kind of task (Brosseau et al., 2007; Kennedy et al., 2008). Results that we have obtained on the inverted mouse task more specifically suggest that it requires the involvement of inhibition functions during the first stage of learning (Lejeune, Catale, Schmitz, et al., 2013). The results showed that at the beginning of the learning process the youngest children (7-year-olds) had more difficulties adapting to the task than older children (10-year-olds). We suggested that the young children's inhibition abilities may not have been sufficiently developed to allow them to perform the task efficiently at the outset. In light of this analysis, the observed difference in performance speed between the two groups in the present study may be thought to be related to a lack of executive control among children with DCD. Indeed, several studies have pointed to executive dysfunction in this disorder (Alloway, 2007; Mandich, Buckolz, & Polatajko, 2002; Wilson & Maruff, 1999). However, in the present study, children with DCD scored similarly to controls on tasks measuring inhibition and flexibility. Piek et al. (2004) suggested that executive deficits could be linked to the frequent comorbidity of DCD with ADHD, and more specifically to hyperactivity and impulsivity. But none of the children with DCD presented scores above the cutoff on the hyperactivity and impulsivity subscale of the Conners Parents Rating Scale (Dugas et al., 1987). Therefore, this explanation in terms of executive dysfunction seems quite unlikely.

An alternative explanation for slowed execution times could relate to the type of processing that each group used to perform the procedural task. DCD children might have called on more cognitive resources during the procedural task to learn at a rate similar to control children. In support of this view, fMRI study have recently shown that children with DCD activate twice as many brain regions as controls to perform a motor task requiring eye-hand coordination (Zwicker et al., 2010). The authors suggested that children with DCD might have to make greater efforts to achieve motor performance similar to that of control children.

To conclude, although some unresolved questions will have to be explored in the future, the important result of this study is that DCD children learned a perceptuomotor adaptation task at a similar rate to control children, regardless of what phase of procedural learning was examined. Indeed, children with DCD benefited as much as control children from training, and were able to transfer the skill they had learned to a more complex task. However, the question of why DCD children remained slower than their age-matched controls in the inverted mouse condition, despite equivalent practice, remains unresolved. Studies on procedural learning in DCD are still too scarce, and efforts should be made in this direction in order to further our understanding of the exact nature of the motor difficulties of children with DCD, as well as the cognitive mechanisms involved during learning in perceptuomotor adaptation tasks.

**AUTOMATISATION D'UNE
HABILETÉ DE DESSIN EN MIROIR
DANS LE TROUBLE DE
L'ACQUISITION DE LA
COORDINATION : RESULTATS
PRELIMINAIRES**

Cette section présente les résultats préliminaires d'une étude portant sur l'automatisation d'une habileté de dessin en miroir qui a été conduite auprès de 15 enfants atteints d'un trouble de l'acquisition de la coordination (et de 15 enfants de contrôle). Nous commencerons par décrire le contexte dans lequel s'insère cette recherche, de même que les objectifs précis de l'étude. Nous présenterons ensuite les résultats que nous avons obtenus.

INTRODUCTION

L'objectif de notre étude visait à explorer l'hypothèse, proposée par Nicolson et Fawcett (2007), d'un déficit de la mémoire procédurale dans le trouble de l'acquisition de la coordination. A l'heure actuelle, les données que nous avons obtenues dans les Etudes 4 et 5 ne permettent pas de confirmer cette proposition. En effet, les résultats ont mis en évidence un taux d'amélioration, au cours des essais d'entraînement, similaire entre les enfants TAC et les enfants de contrôle, ce qui est consistant avec certaines données de la littérature (Missiuna, 1994; Revie & Larkin, 1993). Toutefois, une question demeure : si, comme nous l'avons démontré, les enfants TAC sont capables d'améliorer leur performance motrice à la suite d'une pratique répétée de la tâche, *ont-ils pour autant automatisé cette habileté ?* Pour rappel, l'automatisation est la phase ultime du processus d'apprentissage en mémoire procédurale, qui se développe graduellement. Le caractère automatique d'une habileté est généralement démontré par le fait que la performance ne dépend plus de la disponibilité des ressources attentionnelles ; l'habileté peut alors être réalisée aisément, en même temps qu'une autre tâche (Chauvel et al., 2012).

Une série de données expérimentales et d'observations cliniques fournissent des éléments convergents en faveur de l'hypothèse d'un déficit spécifique dans les processus d'automatisation parmi les enfants TAC. *Premièrement*, dans une expérience qui consistait à rester en équilibre sur une planche, Tsai et al. (2009) ont montré que l'introduction d'une tâche cognitive secondaire affectait de façon significative la performance des enfants TAC, suggérant ainsi que l'exécution d'une habileté motrice pouvait être moins automatique pour ces enfants. Dès lors, ils compenseraient ce déficit par le recrutement intensif de processus contrôlés, plus

coûteux en ressources attentionnelles. *Deuxièmement*, les observations cliniques des enfants TAC mettent clairement en évidence des difficultés pour automatiser les gestes de la vie quotidienne (écrire, nouer ses lacets, ...). *Troisièmement*, une étude récente en neuro-imagerie (Zwicker et al., 2011) a montré, chez des enfants TAC, une sous-activation dans les circuits cortico-cérébelleux (qui sont particulièrement impliqués dans la phase d'automatisation de l'apprentissage ; voir Doyon et al., 2003) lors de la réalisation d'une tâche motrice censée être automatisée. *Enfin*, l'Etude 5 que nous avons décrite ci-avant a montré que les enfants TAC étaient plus lents que les enfants de contrôle pour réaliser la tâche motrice de souris inversée. Une de nos hypothèses était que cette lenteur persistante (même en fin d'apprentissage, quand la performance atteint un plateau) pouvait être due à un déficit spécifique touchant les processus d'automatisation. En d'autres termes, alors que la performance motrice était réalisée avec aisance par le groupe contrôle, les sujets TAC devaient, quant à eux, fournir plus d'effort (c'est-à-dire engager davantage de ressources cognitives) pour réaliser la tâche motrice puisque celle-ci n'était pas automatisée.

A l'heure actuelle, l'idée selon laquelle une atteinte spécifique dans la capacité à automatiser de nouvelles procédures motrices pourrait être à l'origine des troubles moteurs présentés par les enfants TAC n'a encore été que très peu explorée. L'objectif de la présente étude était d'investiguer le degré d'automatisation d'une nouvelle habileté procédurale chez les enfants TAC (comparés à des enfants de contrôle), en utilisant le paradigme de double tâche. Sur le plan méthodologique, la tâche d'apprentissage procédural que nous avons utilisée est le dessin en miroir. Les épreuves expérimentales ainsi que la procédure de passation sont identiques à celles de l'Etude 3, si ce n'est que la tâche secondaire auditive (dite « interférente ») n'est introduite qu'à la fin de la phase d'entraînement. L'objectif de cette étude visait à déterminer si la performance des enfants TAC à la tâche principale de dessin en miroir pouvait se dégrader au moment de l'introduction de la tâche interférente ; notre hypothèse est en effet que, comparativement aux enfants de contrôle, ce nouveau geste reste toujours sous contrôle attentionnel chez les enfants TAC.

METHODE

Sujets

Quinze enfants TAC âgés de 7 à 12 ans (5 filles et 10 garçons ; moyenne d'âge = 10 ans 2 mois) et 15 enfants de contrôle appariés sur base de l'âge, du genre, de l'indice de compréhension verbale (WISC-IV) et du niveau d'études de la mère participent à cette étude. Les enfants étaient sélectionnés sur base des mêmes critères que ceux appliqués pour les deux précédentes études (Etudes 4 et 5). Pour les enfants TAC, des épreuves additionnelles qui évaluent les compétences visuo-constructives, les praxies gestuelles, les traitements visuo-spatiaux et le graphisme, sont utilisées comme critères complémentaires afin d'affiner le diagnostic (les données sont présentées dans la section Résultats). Des tâches exécutives, évaluant l'inhibition, la flexibilité et la mémoire de travail, ont également été administrées à tous les enfants. Les résultats ne mettent pas en évidence de différences significatives ($p > .10$) aux épreuves d'inhibition et de flexibilité (qui avaient également été administrées dans l'Etude 5). Par contre, les enfants TAC présentaient des difficultés dans la tâche de mise à jour de la batterie TEA (Zimmerman & Fimm, 1994), comparativement aux enfants de contrôle ($p = .004$).

Matériel et procédure

Tâche de dessin en miroir

Les épreuves expérimentales, ainsi que la procédure de passation, étaient identiques à une étude précédente, que nous avons menée auprès d'enfants tout venant (voir Etude 3), si ce n'est qu'avant d'effectuer la tâche de dessin en miroir (suivant en cela la procédure adoptée par Rouleau et al., 2002), tous les enfants réalisaient une tâche de familiarisation. Celle-ci consistait à tracer en miroir des lignes horizontales, verticales et des angles dont l'interligne diminuait progressivement, jusqu'à 1 cm (l'écart entre les lignes était ainsi de 4, 3, 2 puis 1 cm). Au cours de ce test, l'examineur pouvait guider la main de l'enfant si cela s'avérait nécessaire. L'objectif de cette étape était d'accompagner les enfants dans les premières étapes de l'apprentissage, dont on sait qu'elles peuvent être particulièrement laborieuses pour les enfants TAC. En incorporant cette étape de familiarisation, les sujets se sentaient ainsi plus en confiance pour

démarrer la phase d'entraînement (composée de 20 essais répartis en deux séances, séparées par un délai d'une semaine).

RESULTATS ET DISCUSSION

Les données ont été regroupées par blocs de deux essais. La première séance comportait donc cinq blocs (ou dix essais), et la seconde comportait quatre blocs d'apprentissage (ou huit essais) ainsi qu'un bloc de deux essais durant lequel la tâche interférente était introduite⁶⁸.

Les résultats sont présentés dans les Tableaux 1 et 2. Dans un premier temps, l'évolution des performances (en termes de temps et d'erreurs) a été examinée au fil des blocs d'entraînement. Pour ce faire, nous avons réalisé des analyses de variance (ANOVA) à mesures répétées avec la variable bloc comme facteur intra-sujets (9 blocs) et la variable groupe (TAC versus contrôle) comme facteur inter-sujets.

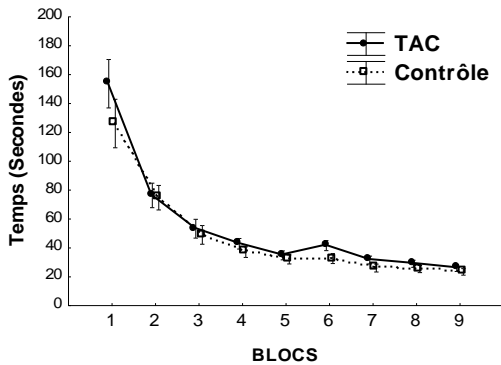
Concernant le temps d'exécution aux différents blocs d'entraînement, il n'y avait pas de différence entre les deux groupes d'enfants. Par contre, les enfants TAC sont restés moins précis que les enfants de contrôle, et ce tout au long des deux séances d'entraînement (ils commettent plus d'erreurs). La présence d'un plus grand nombre d'erreurs (c'est-à-dire de sorties du parcours) chez les enfants TAC (comparativement aux enfants de contrôle) avait déjà été mise en évidence dans la condition contrôle, sans miroir (M_{erreurs} pour le groupe TAC = 1,27 et pour le groupe contrôle = 0,20 ; $t(28) = 3.07$, $p = .004$). Afin de contrôler la précision visuo-motrice des enfants TAC (mesurée dans la condition contrôle sans miroir), une analyse de covariance a été réalisée, utilisant le nombre d'erreurs dans la condition sans miroir comme mesure de contrôle. Cette nouvelle analyse montre que l'effet du groupe (TAC *versus* contrôle) sur les différents blocs reste significatif même lorsque cette variable est prise en considération.

⁶⁸ Pour rappel, cette tâche consistait à répondre à des questions ouvertes (« Quel est ton animal préféré ? ») ou fermées (« Est-ce que tu prends le bus pour aller à l'école ? »).

Tableau 1

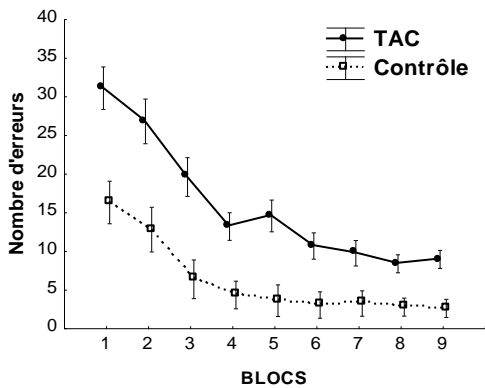
Comparaison de la performance des deux groupes d'enfants à la tâche de dessin en miroir

1. Temps d'exécution



ANOVA : Effet significatif du Bloc, $F(8, 224) = 87.72, p < .001, \eta^2_p = .76$. Les effets du groupe et l'interaction Groupe x Bloc ne sont pas significatifs, $F(1, 28) = 1.09, p = .30, \eta^2_p = .04$; $F(8, 224) = 1.04, p = .41, \eta^2_p = .03$, ce qui indique que les enfants TAC sont aussi rapides que les enfants de contrôle et que l'amélioration de la performance quantitative est similaire dans les deux groupes.

2. Erreurs



ANOVA : Effets significatifs du groupe, $F(1, 28) = 15.79, p < .001, \eta^2_p = .36$, et du bloc, $F(8, 224) = 64.30, p < .001, \eta^2_p = .70$. Les enfants TAC commettaient significativement plus d'erreurs que les enfants de contrôle. L'interaction Bloc x Groupe est significative, $F(8, 224) = 4.74, p < .001, \eta^2_p = .14$, indiquant que la diminution du nombre d'erreurs est plus importante chez les enfants TAC que chez les enfants de contrôle (cela étant dû à un effet plancher observé chez les enfants de contrôle).

Ensuite, les données mettent en évidence un taux d'amélioration de la performance (en termes de vitesse et de précision) au cours des blocs d'entraînement similaire entre les deux groupes d'enfants (Tableau 1). Nos résultats, qui révèlent des capacités d'apprentissage procédural préservées dans le TAC, sont consistants avec certaines données de la littérature (Missiuna, 1994; Revie & Larkin, 1993), ainsi qu'avec les résultats de notre 5^{ème} étude.

Enfin, afin d'examiner l'impact de la tâche interférente introduite lors du dernier bloc d'apprentissage, nous avons comparé les différences de performance à la tâche de dessin en miroir entre le bloc 9 (en condition de simple tâche) et le bloc 10 (en condition de double tâche). Nous présentons uniquement les données obtenues pour le temps d'exécution, car bien que les enfants TAC restent moins précis que les enfants de contrôle, nous constatons que cette différence de précision ne varie pas entre les blocs 9 et 10. En ce qui concerne les résultats obtenus à la tâche interférente (c'est-à-dire le nombre de réponses données par l'enfant), l'effet du groupe n'est pas significatif ($M_{\% \text{tage de réponses}}$ pour le groupe TAC = 95,85% et pour le groupe contrôle = 98,67% ; $t(28) = -1.81, p = .10$), ce qui indique que les deux groupes d'enfants ont traité la tâche interférente de manière similaire. Une ANOVA avec le groupe (TAC versus contrôle) comme variable inter-sujets et l'impact de la tâche interférente (bloc 9 versus bloc 10) comme variable à mesures répétées révèle que l'introduction de la tâche interférente a un effet sur la performance (soit une augmentation des temps de réponse au bloc 10 par rapport au bloc 9), mais cet effet est identique pour les deux groupes de sujets, comme en atteste l'absence d'interaction Groupe x Bloc (voir Tableau 2). Toutefois, une analyse détaillée de nos résultats révèle qu'un sous-groupe d'enfants TAC ($n = 5$) présente une diminution significative des performances à la tâche principale de dessin en miroir par rapport aux enfants de contrôle, résultant de l'introduction de la tâche interférente⁶⁹. Ce résultat suggère que les traitements cognitifs sous-jacents à la performance motrice nécessitent davantage de ressources attentionnelles chez ces 5 enfants TAC comparativement aux autres enfants. Plus généralement, l'exécution d'une habileté motrice pourrait être moins automatique pour ces enfants.

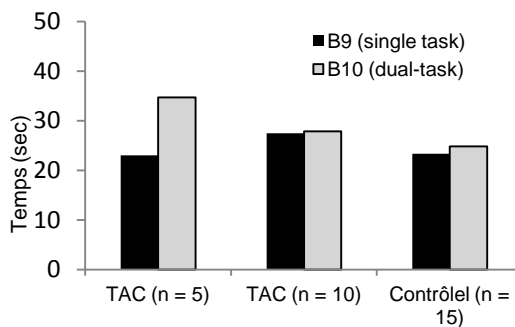
⁶⁹ Ces enfants ont été détectés sur base d'un indice d'interférence calculé pour chaque enfant par la formule suivante : $(\text{bloc 10} - \text{bloc 9}) / (\text{bloc 10} + \text{bloc 9})$. Après transformation des données en Z-scores, les résultats mettent en évidence que 5 enfants TAC présentent un Z-score négatif supérieur à 1,66. Dans le groupe contrôle, aucun enfant ne se situe sous ce score seuil.

Tableau 2

Effet de l'introduction de la tâche interférente sur le temps d'exécution de la tâche de dessin en miroir

Effet de la double tâche sur le bloc 10

ANOVA : Un effet de la tâche interférente, $F(1, 28) = 7.40$, $p = .01$, $\eta^2_p = .21$ qui se marque par une augmentation des temps de réponse lors de l'introduction de la tâche interférente au cours du bloc 10. Les effets du groupe (TAC versus contrôle) et l'interaction Bloc x Groupe ne sont pas significatifs, $F(1, 28) = 1.84$, $p = .18$, $\eta^2_p = .06$ et $F(1, 28) = 1.70$, $p = .20$, $\eta^2_p = .06$, respectivement.



Analyses individuelles : L'effet de la tâche interférente est significatif pour un sous-groupe d'enfants TAC ($n = 5$), $p < .001$, $\eta^2_p = .22$, mais pas pour les autres enfants TAC ($n = 10$), ni pour le groupe contrôle, $p > .10$.

Note. B = bloc

Nous avons ainsi scindé le groupe d'enfants TAC en deux sous-groupes (enfants TAC avec un déficit d'automatisation, TAC_{avecDA} versus enfants TAC sans déficit d'automatisation, TAC_{sansDA}) afin de déterminer si des différences de performance pouvaient également être observées durant la phase d'entraînement (blocs 1 à 9). Etant donné la taille de nos deux échantillons, nous avons focalisé nos interprétations sur les d de Cohen⁷⁰ (voir Tableau 3). *Premièrement*, l'analyse de leur performance au cours de la phase d'acquisition montre que ces 5 enfants (TAC_{avec DA}) étaient, en général, moins précis (c'est-à-dire qu'ils commettaient plus d'erreurs) que les 10 autres enfants TAC. Cet effet était principalement marqué à la fin de la période d'entraînement (au cours du bloc 9). *Deuxièmement*, le calcul d'un indice d'apprentissage de la

⁷⁰ J. Cohen (1988) propose les conventions suivantes : Taille d'effet limitée ($d = 0,20$) ; Taille d'effet moyenne ($d = 0,50$) ; effet Important ($d = 0,80$).

performance qualitative⁷¹ au cours des blocs d'entraînement révèle une différence significative entre les deux groupes, indiquant que l'amélioration de la performance qualitative était moins importante dans le groupe TAC_{avecDA} que dans le groupe TAC_{sansDA}. Aucune différence n'était par contre révélée au niveau de la performance quantitative (vitesse d'exécution).

Tableau 3

Comparaison de la performance des deux sous-groupes d'enfants TAC au début versus à la fin de la période d'entraînement ainsi que sur l'indice d'apprentissage

| | TAC _{avec DA} (n = 5) | TAC _{sans DA} (n = 10) | d de Cohen |
|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| Temps d'exécution | | | |
| <i>Bloc 1</i> | 144,8 | 158,15 | <i>d</i> = 0,17 |
| <i>Bloc 9</i> | 23,00 | 27,4 | <i>d</i> = 0,44 |
| Nombre d'erreurs | | | |
| <i>Bloc 1</i> | 34,1 | 29,65 | <i>d</i> = 0,37 |
| <i>Bloc 9</i> | 12,8 | 7,05 | <i>d</i> = 1,02* |
| Indice d'apprentissage | | | |
| <i>Calculé sur le temps</i> | 0,80 | 0,81 | <i>d</i> = 0,19 |
| <i>Calculé sur les erreurs</i> | 0,59 | 0,75 | <i>d</i> = 1,12* |

Note. * Taille d'effet important ($d > 0,80$) selon les recommandations de Cohen (1988).

Bien que les résultats doivent être interprétés avec prudence étant donné la taille de notre échantillon, ils révèlent qu'un sous-groupe d'enfants TAC ($n = 5$) présente des difficultés dans l'acquisition d'une nouvelle habileté procédurale. Dans l'ensemble, nos données rejoignent celles obtenues par Cantin et al. (2007) et par Lord et Hulme (1988) qui montrent que seul un sous-groupe d'enfants TAC présente un dysfonctionnement de la fonction cérébelleuse et des difficultés à développer des programmes moteurs. Ils sont également congruents avec l'hétérogénéité connue dans la population d'enfants TAC.

⁷¹ L'indice d'apprentissage était calculé comme suit : (score sur le 1^{er} bloc – score sur le 9^{ème} bloc) ÷ score sur le 1^{er} bloc (De Guise et al., 1999).

Afin de mieux cerner le profil des enfants TAC_{avecDA} par comparaison avec les enfants TAC_{sansDA}, nous avons comparé la performance réalisée par ces deux groupes au bilan de base (qui consistait en des épreuves praxiques, visuo-spatiales, etc.). Les résultats sont présentés dans le tableau 4. L'analyse de ces données ne révèle pas un profil particulier de résultats parmi les 5 enfants TAC_{avecDA} (comparativement aux autres enfants).

Tableau 4

Comparaison des performances obtenues par les deux sous-groupes d'enfants TAC sur un ensemble de tâches

| Epreuves | TAC _{avec DA} (n = 5) | TAC _{sans DA} (n = 10) | d de Cohen |
|---|-----------------------------------|------------------------------------|------------------|
| Indice de Compréhension Verbale (NS) | 113,7 | 114,2 | d = 0,02 |
| Praxies gestuelles (NS) | 7,2 | 7,2 | d = 0,00 |
| Praxies visuo-constructives (NS) | | | |
| <i>Copie de figures</i> | 87,4 | 77,75 | d = 0,75 |
| <i>Cubes</i> | 5,4 | 7,9 | d = 0,78 |
| Fonctions visuo-spatiales (NS) | 8,3 | 8,4 | d = 0,03 |
| Précision visuo-motrice (score total) | 26,7 | 26,4 | d = 0,04 |
| M-ABC - dextérité manuelle (score total) ^a | 8,1 | 10,9 | d = 0,84* |
| M-ABC - maîtrise de balle (score total) ^a | 2,8 | 4,1 | d = 0,72 |
| M-ABC - équilibre (score total) ^a | 6,85 | 6,3 | d = 0,20 |

Note. NS = note standard ; les zones **en gras** indiquent le groupe qui a obtenu des résultats plus faibles (NB : à la M-ABC, contrairement aux autres tâches, plus le score est élevé, plus les difficultés sont importantes).

* Taille d'effet important ($d > 0,80$) selon les recommandations de Cohen (1988).

Une des critiques que nous pouvons adresser à cette étude est que notre échantillon était petit. Le fait de révéler que seul un sous-groupe d'enfants présente un déficit d'automatisation est, en soi, intéressant, mais de futurs travaux devront s'atteler à confirmer cette observation et tenter de comprendre les causes sous-jacentes à ce déficit.

En résumé, l'objectif de cette expérience était d'explorer les capacités d'apprentissage procédural chez les enfants TAC (comparativement à des enfants de contrôle). Plus spécifiquement, nous voulions investiguer la capacité des enfants à automatiser une nouvelle habileté de dessin en miroir. Pour ce faire, une tâche interférente auditive était

introduite à la fin de la phase d'entraînement. Les résultats de cette expérience ont montré que la plupart des enfants TAC ont acquis l'habileté de dessin en miroir aussi rapidement, mais moins précisément (ils commettent plus d'erreurs) que les enfants de contrôle. Des analyses individuelles révèlent toutefois qu'un déficit d'automatisation était présent dans un sous-groupe d'enfants TAC ($n = 5$). Dans ce contexte, si l'hypothèse proposée par Nicolson et Fawcett (2007) ne peut être totalement confirmée, elle ne peut pas non plus être rejetée. Les résultats de notre étude doivent être considérés comme préliminaires ; ils soulignent toutefois l'importance de tester l'automatisation d'une habileté procédurale dans de futures recherches qui devront être menées auprès d'un échantillon plus important d'enfants atteints d'un trouble de l'acquisition de la coordination.

DISCUSSION GENERALE

DISCUSSION GENERALE

L'objectif général de notre travail était d'explorer la mémoire procédurale au cours du développement normal et dans le trouble de l'acquisition de la coordination, en prêtant une attention particulière à l'apprentissage d'habiletés perceptivo-motrices. Avant d'examiner plus précisément les implications de nos résultats sur les plans théorique et clinique, il est utile de les résumer brièvement. Par ailleurs, un aspect important de ce travail a consisté à mettre au point des tâches d'apprentissage procédural adaptées aux jeunes enfants ainsi qu'aux enfants présentant des troubles moteurs. Enfin, nous clôturerons cette discussion en abordant l'intérêt et les limites de ces épreuves expérimentales.

SYNTHESE DES RESULTATS

L'objectif principal de la première partie de notre travail était de contribuer à une meilleure compréhension du développement de la mémoire procédurale. Plus spécifiquement, dans l'**Etude 1**, nous voulions explorer le développement des formes implicites d'apprentissage procédural à l'aide de la tâche de temps de réaction sériel (TRS). Quelques travaux sur l'apprentissage implicite de régularités séquentielles ont confirmé que ces capacités étaient présentes tôt dans le développement (par exemple, Clohessy et al., 2001). Toutefois, à ce jour, le nombre limité d'études chez l'enfant n'a pas permis d'apporter de réponse claire à la question de l'invariance développementale de ces capacités. Notre étude s'inscrit dans ce contexte et vise à déterminer [1] si une influence de l'âge pouvait être observée dans l'apprentissage spécifique de la séquence et [2] si cet apprentissage pouvait varier en fonction de certaines caractéristiques de la séquence, telles que sa longueur. Pour ce faire, nous avons comparé l'apprentissage d'une séquence de 8 *versus* 12 éléments auprès de 128 participants répartis en 4 groupes d'âge (4, 7 et 10 ans ainsi qu'un groupe de jeunes adultes) sur une version adaptée de la tâche de TRS (avec un écran tactile comme mode de réponse). Les résultats ont montré que les enfants âgés entre 4 et 10 ans sont capables d'apprendre une séquence de second ordre (SOC) aussi bien que des sujets adultes. Nous mettons également en évidence un effet de la longueur de la

séquence (la séquence de 8 éléments était mieux apprise que la séquence de 12 éléments), indépendamment de l'âge des sujets. Ceci laisse supposer, dans un premier temps, que plus la séquence comporte d'éléments, plus elle est apprise difficilement. Toutefois, une autre explication que la longueur de la séquence pourrait également rendre compte des différences de performance. En effet, il est possible que la structure statistique particulière de la séquence de 8 items, par rapport à la séquence de 12 items, explique les différences d'apprentissage ; dans la séquence de 12 éléments, chaque localisation est suivie par 3 autres localisations alors que dans la séquence de 8 éléments, chaque stimulus est suivi par deux autres localisations (par exemple, 3 est suivi de 4 ou de 2, mais n'est jamais suivi de 1)⁷². Par conséquent, avec la séquence de 8 éléments, l'apprentissage d'informations de premier ordre (du type « 3 n'est jamais suivi de 1 ») aurait pu faciliter l'apprentissage par rapport à la séquence de 12 éléments (dans laquelle toutes les associations simples entre les paires de stimuli sont présentées avec une fréquence équivalente). Des analyses complémentaires ne confirment toutefois pas cette hypothèse ; les recherches futures devront viser à comprendre l'influence relative de la longueur et/ou de la structure de la séquence dans la performance à ce type de tâche. Enfin, en ce qui concerne les résultats au test explicite de génération libre, la performance était similaire entre les groupes de sujets ; il n'y avait par ailleurs aucune corrélation entre les mesures implicite et explicite d'apprentissage, ce qui confirme que les performances à la tâche de TRS que nous avons utilisée sont principalement sous-tendues par des mécanismes implicites. Dans l'ensemble, les résultats de cette étude appuient l'idée selon laquelle les processus d'apprentissage implicite sont efficaces tôt dans le développement, confirmant ainsi les conclusions d'autres auteurs (Meulemans et al., 1998; voir aussi Karatekin et al., 2007).

Cette situation d'apprentissage incident n'est toutefois pas représentative de la majorité des tâches procédurales, lesquelles se caractérisent, en début d'apprentissage, par la prise de conscience explicite par le sujet des principales variables en jeu. On considère généralement que l'encodage en mémoire procédurale dépend de l'intervention de nombreux composants cognitifs (par exemple, Ackerman & Cianciolo, 2000 ; Anderson,

⁷² Pour rappel, les séquences utilisées étaient les suivantes : 8A = 34121432 ou 8B= 42132431; 12A = 341243142132 ou 12B = 342312143241.

1982). L'habileté n'est réalisée de façon autonome (implicite) qu'à partir du moment où la procédure est totalement automatisée. Dans l'**Etude 2**, nous avons ainsi confronté des enfants de 7 et de 10 ans, ainsi qu'un groupe de jeunes adultes, à une tâche d'adaptation perceptivo-motrice qui nécessite de modifier une association sur-apprise entre la vision et le comportement moteur. L'objectif de cette recherche était d'explorer le développement des capacités d'apprentissage procédural chez l'enfant et, conjointement, d'analyser l'implication des processus exécutifs (inhibition, flexibilité et mémoire de travail) au cours de la première phase (par opposition aux stades ultérieurs) du processus d'acquisition de la nouvelle habileté. La tâche impliquait de tracer le contour d'une forme géométrique sur un écran d'ordinateur en manipulant une souris d'ordinateur en position inversée. Les résultats qui ont été obtenus sont intéressants à plusieurs égards. *Premièrement*, les enfants les plus jeunes ont présenté plus de difficultés à s'adapter à la tâche de souris inversée (ils étaient plus lents et ont commis plus d'erreurs, particulièrement durant les premiers essais d'apprentissage) que les enfants de 10 ans. *Deuxièmement*, en dépit de cet effet de l'âge observé en début d'apprentissage, tous les enfants ont amélioré leur performance au cours des blocs d'entraînement et ce, aussi bien que les adultes. En outre, le transfert de l'habileté à une situation différente de celle qui a été entraînée était identique entre les trois groupes d'âge. *Troisièmement*, des analyses corrélationnelles ont montré que l'inhibition joue un rôle significatif dans la performance initiale, chez les enfants de 10 ans comme chez les adultes ; l'implication de ce processus diminue avec la pratique de la tâche. Par contre, les corrélations avec la flexibilité et la mémoire de travail n'étaient pas significatives. Concernant les enfants de 7 ans, aucun lien avec les fonctions exécutives n'était révélé. Ainsi, les différents résultats de cette deuxième étude confirment l'importance des mécanismes exécutifs (et plus particulièrement, l'inhibition) dans les premières étapes de l'apprentissage (pour autant que ces fonctions soient suffisamment développées). Toutefois, les résultats obtenus chez les enfants les plus jeunes suggèrent que l'intervention de ces processus de contrôle ne serait pas une condition nécessaire à l'acquisition de l'habileté.

L'objectif de l'**Etude 3** était d'explorer plus avant le rôle joué par les mécanismes explicites durant les premiers essais de l'apprentissage procédural chez des enfants âgés de 7 et de 10 ans. Bien que les théories traditionnelles considèrent que les

phases initiales de l'apprentissage sont principalement soutenues par des processus explicites, nous avons émis l'hypothèse que, chez les jeunes enfants, les processus implicites prédominent durant les phases initiales de l'acquisition. Pour ce faire, nous avons testé, à l'aide du paradigme de double tâche, l'effet d'une tâche secondaire auditive (dite « interférente »), introduite en début d'apprentissage, sur la performance à la tâche procédurale de dessin en miroir. Les résultats ont mis en évidence un impact *différentiel* de la double tâche selon l'âge des enfants durant les premiers essais d'apprentissage. L'introduction de la tâche interférente chez les enfants de 10 ans a entraîné un ralentissement de la vitesse de réalisation et une augmentation du nombre d'erreurs comparativement aux enfants de même âge en situation de tâche simple. Cet effet d'interférence important suggère que les mécanismes sous-tendant les premiers essais d'apprentissage chez les enfants de 10 ans reposent sur des stratégies explicites (coûteuses en ressources attentionnelles). A l'inverse, l'interférence entre les deux tâches était faible pour les enfants de 7 ans, ce qui suggère que leur performance est principalement sous-tendue par des mécanismes implicites, peu coûteux en ressources attentionnelles. En outre, les résultats obtenus au cours des essais subséquents montrent que tous les groupes acquièrent l'habileté de dessin en miroir de façon similaire. A noter que la tâche interférente, réintroduite lors des deux derniers essais d'entraînement, n'avait plus d'impact sur la performance des enfants, confirmant l'automatisation de la connaissance acquise.

La seconde partie de ce travail avait pour objectif de tester l'hypothèse d'un déficit des capacités de mémoire procédurale dans le trouble de l'acquisition de la coordination.

Dans l'**Etude 4**, nous avons comparé la performance d'enfants TAC avec celles d'enfants de contrôle (âgés de 6 à 12 ans) sur une variante de la tâche de temps de réaction sériel, identique à l'Etude 1 (avec un écran tactile comme mode de réponse). Les trois études réalisées précédemment avec le TRS ont fait état de résultats contrastés (Gheysen et al., 2011; Mayor-Dubois et al., 2012; Wilson et al., 2003) et ont soulevé une question particulière : les difficultés présentées par les enfants TAC à la tâche de TRS reflètent-elles un déficit dans l'apprentissage procédural en tant que tel, ou sont-elles liées à la modalité de réponse (qui, en raison des troubles moteurs présentés par ces enfants, pourrait interférer avec l'apprentissage) ? Nos résultats ont

confirmé la seconde hypothèse. En effet, les enfants TAC de notre échantillon ont répondu aussi rapidement que les enfants de contrôle, ce qui suggère que la modalité de réponse était adaptée pour ces enfants. Les données ont également révélé des performances strictement équivalentes entre les deux groupes d'enfants dans l'apprentissage spécifique de la séquence. Les résultats au test explicite de génération libre ont indiqué que la performance à la tâche de TRS était principalement sous-tendue par des mécanismes implicites et ce, dans les deux groupes d'enfants.

Dans l'**Etude 5**, nous avons administré à ces mêmes enfants une tâche d'adaptation perceptivo-motrice (une version simplifiée de la tâche de souris inversée utilisée dans l'Etude 2). Un certain nombre d'études suggèrent que les enfants TAC présentent des difficultés dans ce type de tâche (voir par exemple, Brookes et al., 2007). Toutefois, aucune de ces recherches ne nous a renseignée sur les capacités d'apprentissage procédural en tant que telles, c'est-à-dire sur les différentes étapes qui conduisent à l'automatisation. Dans ce contexte, l'objectif de notre étude était de comparer la performance des enfants TAC à celle d'enfants de contrôle lors des trois phases (rapide, lente et de consolidation) de l'apprentissage procédural. Cette étude a mis en évidence trois résultats principaux. *Premièrement*, au cours de la première session d'entraînement (soit dans la phase rapide de l'apprentissage), une amélioration importante de la vitesse d'exécution était observée dans les deux groupes d'enfants. *Deuxièmement*, des gains spontanés de performance entre les deux sessions d'entraînement ont également été révélés chez les enfants TAC et chez les enfants de contrôle. *Troisièmement*, nous avons montré, dans les deux groupes d'enfants, une stabilisation de la performance durant la seconde session d'entraînement (soit dans la phase lente de l'apprentissage). Enfin, les résultats n'ont pas mis en évidence de différence entre les deux groupes d'enfants en ce qui concerne le transfert de l'habileté de souris inversée à une tâche plus complexe (nécessitant davantage de précision dans le mouvement). Ces résultats indiquent que les capacités d'acquisition d'une nouvelle habileté sont préservées dans le TAC, ce qui concorde avec certaines données de la littérature (Missiuna, 1994; Revie & Larkin, 1993). Toutefois, les enfants TAC restent plus lents que les enfants de contrôle aux différents essais ; les différences mises en évidence en début d'apprentissage ne se dissipent pas avec l'entraînement.

L'objectif de la dernière étude (**Etude 6**) était d'explorer plus spécifiquement les capacités d'automatisation d'une habileté de dessin en miroir chez les enfants TAC (comparés à des enfants de contrôle). Pour ce faire, nous utilisons le paradigme de double tâche. Les épreuves expérimentales ainsi que la procédure de passation étaient identiques à celles de l'Etude 3, si ce n'est que la tâche interférente n'a été introduite qu'à la fin de la phase d'entraînement. Les résultats de cette expérience ont montré que les enfants TAC ont acquis l'habileté de dessin en miroir aussi rapidement, mais moins précisément (ils commettent plus d'erreurs) que les enfants de contrôle. Concernant le dernier bloc d'apprentissage effectué en condition de double tâche, les résultats suggèrent que la plupart des enfants TAC ont automatisé l'habileté procédurale. Seul un sous-groupe d'enfants TAC (33%) est pénalisé par l'introduction de la tâche interférente lors des deux derniers essais d'apprentissage. Dans ce contexte, si l'hypothèse proposée par Nicolson et Fawcett (2007) ne peut être totalement confirmée, elle ne peut pas non plus être rejetée.

IMPLICATIONS THEORIQUES ET CLINIQUES

Statut de la mémoire procédurale dans le développement normal

Comme nous l'avons évoqué dans la partie introductive, le développement de la mémoire procédurale est difficile à caractériser car ce niveau du fonctionnement mnésique renvoie à un ensemble d'habiletés hétérogènes qui peuvent impliquer différents mécanismes cognitifs ayant chacun leur propre trajectoire développementale. Dans la littérature, on ne trouve d'ailleurs aucune référence traitant du développement de la mémoire procédurale en tant que tel. Les études chez l'enfant se sont principalement centrées sur les capacités d'apprentissage implicite. Ces recherches (Karatekin et al., 2007; Meulemans et al., 1998; voir également notre Etude 1) ont mis en évidence que les formes implicites d'apprentissage (évaluées au moyen de la tâche de temps de réaction sériel) sont relativement indépendantes de l'âge (contrairement aux mécanismes explicites qui connaissent une évolution importante tout au long de l'enfance et de l'adolescence).

Toutefois, les situations expérimentales qui ont été utilisées dans ces études ne sont pas représentatives de toutes les situations d'apprentissage procédural (par exemple,

le dessin en miroir) qui, contrairement à la tâche de TRS, se caractériseraient, durant les premières phases, par une étape de traitement très contrôlée nécessitant la coopération de diverses fonctions cognitives (cf. la conception « top-down »). En référence à ces modèles sériels de l'apprentissage (par exemple, Anderson, 1982), l'acquisition de nouveaux savoir-faire pourrait être difficile pour de jeunes enfants, dans la mesure où les processus cognitifs explicites censés intervenir dans les premiers stades de l'apprentissage procédural se développent tardivement durant l'enfance. Dans une perspective développementale, cette hypothèse apparaît cependant peu compatible avec l'idée répandue de l'émergence précoce de la mémoire procédurale (idée appuyée par la maturation précoce des structures cérébrales qui sous-tendent ces formes d'apprentissage). Les nombreuses habiletés procédurales maîtrisées durant l'enfance donnent à penser que d'autres voies d'apprentissage permettent également ce type d'acquisition. A ce jour, toutefois, aucune étude n'avait encore permis de déterminer comment de jeunes enfants acquièrent ce type d'habileté, sachant que leurs mécanismes explicites sont peu efficaces.

Les études que nous avons menées ont permis d'apporter des éléments de réponse à quatre questions principales : [1] *quels sont les mécanismes impliqués dans l'apprentissage procédural chez l'enfant ?* ; [2] *l'acquisition d'habiletés procédurales chez l'enfant relève-t-elle d'un processus « top-down » ou « bottom-up » ?* ; [3] *l'intervention des mécanismes explicites est-elle nécessaire pour que l'apprentissage ait lieu ?* ; [4] et enfin, *comment se développe la mémoire procédurale ?*

Quels sont les mécanismes impliqués dans l'apprentissage procédural chez l'enfant ?

Poser la question du développement de la mémoire procédurale implique inévitablement de s'intéresser aux mécanismes qui sous-tendent la performance des sujets. Dans la littérature chez l'adulte, l'intervention de composants cognitifs spécifiques a été démontrée avec différents types de tâches procédurales. Ainsi, la mémoire épisodique et la mémoire de travail (en plus de l'intelligence générale) interviennent dans les premières phases de l'apprentissage d'une habileté procédurale cognitive (Beaunieux et al., 2006). Dans cette étude, l'implication des capacités de flexibilité a également été révélée durant les phases cognitive et autonome de

l'apprentissage, mais de façon plus ponctuelle. Les études réalisées à l'aide du paradigme de dessin en miroir supportent également la proposition que les processus cognitifs de haut niveau (et en particulier, les processus de contrôle) jouent un rôle clé en début d'apprentissage. (par exemple, Brosseau et al., 2007; Rouleau, Décary, et al., 2002).

Chez l'enfant, la nature des processus mis en jeu lors de l'apprentissage procédural d'une habileté de type dessin en miroir restait une question ouverte. Les résultats que nous avons obtenus (Etude 2) confirment l'importance des mécanismes exécutifs (et plus particulièrement, l'inhibition) dans les phases précoces de l'apprentissage d'une tâche d'adaptation perceptivo-motrice (pour autant que ces fonctions soient suffisamment développées). En effet, dans notre expérience, de bonnes capacités d'inhibition étaient associées à de meilleures performances (en termes de vitesse d'exécution et de précision) lors de la réalisation du premier bloc d'apprentissage à la tâche de souris inversée chez les enfants de 10 ans et les adultes, mais pas chez les enfants de 7 ans. Par contre, nos données ne mettent pas en évidence de corrélations significatives entre les capacités de flexibilité ou de mémoire de travail d'une part, et la performance à la tâche de souris inversée d'autre part. Ceci pourrait, en partie, être lié à un manque de puissance statistique. En effet, l'analyse des tailles d'effet conduit à des résultats plus nuancés, suggérant que ces fonctions exécutives pourraient également être impliquées dans l'apprentissage, chez les enfants de 10 ans et les adultes⁷³. De façon plus indirecte, l'intervention de la mémoire de travail a également été mise en évidence chez les enfants de 10 ans au moyen du paradigme de double tâche (Etude 3). Nous avons en effet montré que l'introduction d'une tâche interférente (qui occupe les ressources en mémoire de travail) avait un effet délétère sur les premiers essais de l'apprentissage d'une habileté de dessin en miroir chez les enfants de 10 ans. En outre, nous n'avons aucune donnée quant au rôle que jouerait la mémoire épisodique dans ce type de tâche, comme cela a été démontré dans l'apprentissage procédural cognitif (Beaunieux et al., 2012; Beaunieux et al., 2009;

⁷³ Les tailles d'effet sont modérées (de l'ordre de .25 pour la corrélation entre mémoire de travail et Bloc 1 chez les enfants de 10 ans), voire importantes (par exemple, de l'ordre de .37 pour la corrélation entre flexibilité et Bloc 1 chez les adultes), selon les recommandations de J. Cohen (1988).

Beaunieux et al., 2006). Ainsi, des recherches ultérieures seront nécessaires pour corroborer nos premiers résultats et les compléter.

Concernant les enfants de 7 ans, les données que nous avons obtenues posent un certain nombre de questions. Pour rappel, dans l'Etude 2, aucun lien avec les fonctions exécutives n'était révélé. En parallèle, les jeunes enfants avaient également plus de difficultés à s'adapter à l'épreuve de souris inversée (ils étaient plus lents et commettaient plus d'erreurs durant les premiers essais d'apprentissage) que les enfants de 10 ans. De notre point de vue, deux hypothèses peuvent être retenues pour expliquer ces résultats. Soit [1] le ralentissement observé dans les premiers essais d'apprentissage de l'habileté procédurale peut simplement être expliqué par le fait que l'inhibition dans ce groupe d'âge n'est pas suffisamment développée pour les aider à accomplir la tâche de souris inversée. Ils pourraient alors rapidement basculer d'une stratégie explicite (peu efficace) vers une stratégie implicite qui leur permet d'atteindre des performances similaires aux enfants plus âgés à la fin de la séance. Soit [2] les enfants plus jeunes utilisent des stratégies différentes comparativement aux enfants plus âgés et aux adultes : la performance serait sous-tendue par des mécanismes implicites dès le début de l'apprentissage. Le recours à des stratégies explicites pourrait être plus difficile pour ces enfants, comme le suggère la littérature sur le développement des processus exécutifs (voir par exemple, Brocki et Bohlin, 2004 ; Jonkman, 2006). Cette hypothèse peut tout d'abord prendre appui sur la mise en évidence de l'absence de corrélation entre les mesures exécutives et procédurales chez les enfants de 7 ans⁷⁴. De plus, les résultats que nous obtenons dans l'Etude 3 révèlent que l'introduction de la tâche interférente n'altère pas la performance des enfants de 7 ans dans les premiers essais de la tâche procédurale. L'apprentissage chez les enfants de 7 ans serait-il moins contrôlé, plus implicite, et donc moins sensible à des interférences de tâches cognitives ? Nous discuterons de ce point en détail dans la section suivante.

Bien que nous ayons concentré nos recherches sur la phase initiale de l'apprentissage procédural, certaines conclusions peuvent également être dégagées quant aux mécanismes impliqués dans les phases plus avancées. Nous sommes bien conscients

⁷⁴ Pour rappel, les indices de corrélation étaient très faibles (de l'ordre de .00 - .08).

que l'automatisation d'une nouvelle habileté requiert une grande quantité de pratique incluant plusieurs sessions d'entraînement. Il convient de garder à l'esprit ce constat afin d'envisager de façon prudente les résultats qui suivent. Dans l'Étude 2, la phase d'entraînement consistait en 12 essais répartis sur une seule séance. A ce stade, le sujet est encore dans la phase dite « rapide » de l'apprentissage (Doyon & Benali, 2005). Nous avons toutefois montré que les corrélations entre les capacités d'inhibition et la performance procédurale n'étaient plus significatives lors du dernier bloc d'entraînement. Cela indique que, chez les enfants de 10 ans et les adultes, la contribution des processus contrôlés tend à diminuer avec la pratique. Les corrélations obtenues montrent toutefois que les capacités cognitives jouent encore un rôle à la fin de la période d'entraînement. Par exemple, chez les enfants de 10 ans, les corrélations entre l'inhibition ou la flexibilité et le dernier bloc d'apprentissage peuvent être qualifiées de « moyennes », selon la classification de J. Cohen (1988). Du côté des participants adultes, il semble que ce soit principalement la mémoire de travail et l'inhibition qui jouent encore un rôle à ce stade de l'apprentissage.

Dans l'Étude 3, deux séances composées chacune de 10 essais ont été consacrées à l'entraînement de l'habileté de dessin en miroir. Chez les enfants, l'introduction de la tâche interférente en fin d'apprentissage n'avait plus d'effet significatif sur la performance procédurale, ce qui suggère que la réalisation de la tâche de dessin en miroir à ce stade de l'apprentissage requiert peu de ressources attentionnelles. Ces résultats sont concordants avec l'idée selon laquelle l'habileté procédurale est automatisée. Plusieurs travaux chez l'adulte montrent que la performance durant la phase dite « autonome » (ou « lente ») de l'apprentissage est principalement déterminée par les habiletés psychomotrices des individus (voir par exemple, Beaunieux et al., 2006). Afin de déterminer plus clairement l'impact de ces fonctions, nous avons décidé d'analyser ces données (non reprises dans l'Étude 3). Étant donné qu'il n'y avait plus d'effet de la condition (simple *versus* double tâche) pour les deux derniers essais d'apprentissage, nous avons regroupé nos données au sein de chaque groupe d'âge (7 *versus* 10 ans). Nous mettons en évidence une corrélation positive significative entre la ligne de base (c'est-à-dire la réalisation de la tâche de dessin sans le miroir) avec le dernier essai d'apprentissage ($r = .33$, $p = .04$ pour les enfants de 7 ans ; $r = .39$, $p = .02$ pour les enfants de 10 ans). Ces résultats suggèrent que plus les

sujets sont rapides et précis dans le maniement du crayon, plus ils sont performants à la tâche de dessin en miroir en fin d'entraînement, ce qui est concordant avec les données de la littérature chez l'adulte.

Pour clore cette section, il convient de préciser que les conclusions obtenues à l'aide de la tâche d'adaptation perceptivo-motrice ne peuvent être généralisées à l'ensemble des situations d'apprentissage procédural. Des études ultérieures, menées avec d'autres types de tâches procédurales (par exemple, une tâche de temps de réaction sériel dans une condition d'apprentissage explicite, qui n'implique pas de contrecarrer un comportement moteur fortement automatisé), seraient du plus grand intérêt afin de compléter les données que nous avons obtenues chez l'enfant.

L'acquisition d'habiletés procédurales chez l'enfant : un processus « top-down » ou « bottom-up » ?

Les données que nous avons récoltées suggèrent que les mécanismes qui sous-tendent la performance initiale à la tâche d'adaptation perceptivo-motrice diffèrent entre nos deux groupes d'âge. D'un côté, les résultats obtenus par les enfants de 10 ans sont compatibles avec une conception *top-down* de l'apprentissage procédural (c'est-à-dire que les premières étapes du processus d'apprentissage sont sous-tendues par des mécanismes explicites, « *effortfull* »), ce qui permet d'optimiser leur performance dans les premiers essais d'apprentissage comparativement aux enfants plus jeunes. De l'autre côté, les données obtenues auprès des enfants de 7 ans appuient une conception *bottom-up* de l'apprentissage procédural (c'est-à-dire que les premières étapes du processus d'apprentissage sont sous-tendues par des mécanismes implicites, peu coûteux en ressources attentionnelles)⁷⁵.

Nos résultats sont ainsi compatibles avec les propositions théoriques qui suggèrent l'existence de deux modes d'acquisition pour l'apprentissage d'une nouvelle habileté motrice (Sun et al., 2001; voir également Willingham, 1998) : l'un qui serait implicite

⁷⁵ Nous avons également observé une manière différente d'aborder la tâche de souris inversée durant les premières étapes de l'apprentissage : les enfants de 7 ans semblaient moins conscients du phénomène d'inversion et procédaient davantage par essais et erreurs, alors que les enfants de 10 ans semblaient avoir directement compris ce qu'impliquait la position inhabituelle de la souris. Contrairement aux enfants de 7 ans, les enfants plus âgés verbalisaient ce qu'ils étaient entrain de faire dès les premiers essais de la procédure : « si je veux aller à droite, je dois faire bouger la souris à gauche ». Ils semblent réaliser la tâche d'une façon plus « stratégique » que les enfants plus jeunes.

(c'est-à-dire le niveau « bottom »), et l'autre explicite (ou « top »). Toutefois, plutôt que d'envisager deux modes d'acquisition indépendants, la plupart des auteurs (par exemple, Gentile, 1998 ; Masters & Maxwell, 2004 ; Sun et al., 2005) suggèrent que les mécanismes implicites et explicites sont présents et agissent *en parallèle* dès le début de l'apprentissage (en opposition à un déroulement « en étapes » ; voir par exemple, Anderson, 1982). La contribution relative des mécanismes explicites et implicites dépendrait [1] des paramètres de la tâche (par exemple, l'ajout d'une tâche interférente conduirait à privilégier les processus implicites) et [2] des capacités cognitives de l'apprenant. On pourrait ainsi suggérer que les enfants de 7 ans engagent majoritairement leurs mécanismes implicites parce que les mécanismes explicites ne sont pas suffisamment développés. Bien sûr, l'intervention de ces mécanismes implicites n'exclut pas que des processus explicites soient également engagés a minima et soutiennent la performance de ces enfants. Ainsi, la différence dans les mécanismes engagés durant la tâche procédurale serait principalement d'ordre *quantitatif*. Ce point de vue est, par ailleurs, tout à fait compatible avec les conceptions théoriques récentes concernant le développement de la mémoire chez l'enfant. Notamment, les recherches menées chez des nourrissons ont permis de démontrer que les mécanismes d'apprentissage explicite et implicite interagissaient entre eux dès les premiers mois de vie (par exemple, voir Rovee-Collier, 1999; Rovee-Collier & Cuevas, 2009).

En outre, le pattern de résultats mis en évidence dans les deux expériences qui utilisent la tâche d'adaptation perceptivo-motrice révèle une dissociation entre, d'une part, les *niveaux de performance* pour un essai donné, qui sont différents entre nos groupes d'âge, et d'autre part, le *taux d'acquisition* (c'est-à-dire l'amélioration de la performance durant l'entraînement) qui, lui, est identique quel que soit l'âge des sujets (Etudes 2 et 3). En effet, malgré des différences manifestes dans l'efficacité des mécanismes explicites, les enfants de 7 ans présentent des capacités d'apprentissage procédural identiques à celles d'enfants plus âgés et de sujets adultes (Etude 2). Un tel constat nous amène à questionner le rôle que jouent réellement les mécanismes explicites durant l'apprentissage procédural.

Les mécanismes explicites durant l'acquisition d'une nouvelle habileté : une condition nécessaire à l'apprentissage ?

Si les mécanismes explicites (et plus particulièrement, les fonctions exécutives) sont essentiels à l'apprentissage procédural, comment de jeunes enfants pourraient-ils apprendre de nouvelles habiletés, sachant que ces mécanismes sont peu efficaces ? Les résultats de nos études apportent un éclairage intéressant concernant cette question.

Bien que des fonctions supérieures (telles que les fonctions exécutives) soient mises en jeu chez les enfants les plus âgés lors des premières phases de l'apprentissage d'une habileté procédurale, nos résultats (Etudes 2 et 3) suggèrent que l'amélioration des performances (c'est-à-dire l'augmentation de la vitesse et de la précision des réponses) au cours de la phase d'entraînement pourrait principalement provenir de l'action des *mécanismes implicites* tant chez les enfants de 7 ans que chez les enfants de 10 ans. Certes, les processus explicites contribuent à contrecarrer une association sur-apprise entre la vision et le comportement moteur, à planifier et ajuster la performance motrice, ce qui facilite l'adaptation à la tâche de souris inversée ou de dessin en miroir pour les enfants les plus âgés. Toutefois, l'analyse de la courbe d'apprentissage, qui ne met en évidence aucun effet de l'âge, suggère que ces processus de contrôle pourraient ne pas être une condition nécessaire pour que l'apprentissage procédural ait lieu. Dans les études que nous avons menées, l'intervention des processus de contrôle permet aux enfants plus âgés de limiter le nombre d'erreurs durant les phases initiales de l'apprentissage, mais n'interviendrait pas directement dans l'apprentissage de l'habileté en tant que tel.

De prime abord, il apparaît assez surprenant d'envisager l'idée selon laquelle les mécanismes explicites joueraient finalement un rôle assez limité, en permettant « simplement » d'être plus performant durant les premiers essais. Pourtant, nos résultats, combinés à certaines données de la littérature, vont dans le sens de cette hypothèse. Par exemple, une étude menée par Richer et collaborateurs (1999) auprès de patients présentant des lésions du cortex frontal montre que les difficultés présentes en début d'apprentissage à la tâche de dessin en miroir n'empêcheraient pas l'apprentissage procédural en tant que tel. Pour ces auteurs, bien que le cortex frontal

soit généralement impliqué dans les premières étapes de l'apprentissage procédural, il ne constituerait pas une condition nécessaire à l'acquisition de l'habileté. De la même manière, Eversheim et Bock (2001) montrent que l'introduction d'une tâche interférente durant l'acquisition d'une nouvelle habileté procédurale (requérant une adaptation perceptivo-motrice) chez de jeunes adultes a un effet sur la performance des sujets, mais pas sur le taux d'acquisition. Enfin, plusieurs études conduites auprès de patients Alzheimer démontrent que les capacités d'apprentissage procédural sont préservées malgré des déficits avérés sur le plan des processus explicites (Beaunieux et al., 2012; Gabrieli et al., 1993; Rouleau, Salmon, et al., 2002).

Toutefois, lorsqu'on se reporte aux situations de la vie « réelle » (à la différence des situations expérimentales), on comprend mieux le rôle que peuvent jouer les mécanismes explicites, et en particulier les processus de contrôle, dans l'acquisition de nouvelles habiletés. En effet, certaines situations d'apprentissage pourraient nécessiter la mise en œuvre des mécanismes exécutifs en raison, par exemple, de l'existence de dangers potentiels. Si l'on prend le cas de l'apprentissage de la conduite automobile, la moindre fausse manœuvre peut être lourde de conséquences, en contraste avec les situations expérimentales dans lesquelles commettre des erreurs ou être plus lent n'a finalement que peu de conséquences pour la personne. De la même manière, on peut imaginer que face à des situations très complexes d'apprentissage (qui nécessitent davantage de contrôle exécutif), de très jeunes enfants ne parviennent pas à acquérir l'habileté en raison d'un manque d'efficacité de ces mécanismes. A cet égard, dans une expérience menée auprès de patients Alzheimer, Rouleau, Salmon, et al. (2002) rapportent qu'un sous-groupe de patients était incapable de réaliser les premiers essais de la tâche de dessin en miroir en raison de moins bonnes capacités exécutives. Plusieurs autres données vont également dans ce sens, en montrant qu'une diminution dans l'efficacité des processus explicites (par exemple, dans le cadre du vieillissement normal) pourrait gêner l'apprentissage (Chauvel et al., 2012).

Pris dans leur ensemble, ces éléments nous amènent ainsi à nuancer notre propos quant au rôle « secondaire » que nous avons accordé aux mécanismes explicites. En effet, comme le suggèrent Sun et al. (2005), dans la plupart des situations, les processus implicites et explicites interagissent pour permettre l'acquisition de l'habileté.

Les mécanismes explicites permettent de soutenir la performance, du moins dans les premières étapes, et pourraient même, dans certaines situations, être une condition nécessaire pour que l'apprentissage ait lieu.

Cela nous renvoie au constat selon lequel l'acquisition d'habiletés est un phénomène hétérogène, regroupant des situations très différentes d'apprentissage qui varient tant par leur nature que par leur complexité. A l'heure actuelle, les études consacrées au développement de la mémoire procédurale durant l'enfance ne sont pas suffisamment nombreuses pour que l'on puisse tirer des conclusions claires quant au rôle joué par les mécanismes explicites durant l'acquisition. Dans les paragraphes qui suivent, nous proposons trois perspectives de recherche qu'il serait intéressant de mener dans de futurs travaux chez l'enfant.

[1] Il pourrait être pertinent de confronter les sujets à des situations *plus complexes* d'apprentissage ou d'inclure des *sujets plus jeunes* dans l'échantillon. A cet égard, nous avons mené plusieurs expériences (non publiées) auprès d'enfants âgés de 4 ans à l'aide de la tâche de souris inversée. L'interprétation des résultats que nous avons obtenus est toutefois problématique dans la mesure où il existe une grande variabilité dans les performances réalisées par ce groupe d'enfants. Nous avons également été confrontés à la difficulté que présente l'élaboration d'outils d'évaluation de ces capacités spécifiquement adaptés aux enfants en bas âge, tout en gardant une sensibilité suffisante pour tester des enfants plus âgés. Les tâches adaptées aux enfants de 4 ans se sont avérées trop simples pour les enfants de 10 ans. A l'inverse, des tâches plus complexes se sont révélées très difficiles à réaliser par les enfants les plus jeunes, probablement en raison de facteurs confondants liés aux limitations sur le plan moteur et/ou cognitif.

[2] Le paradigme de *double tâche* semble particulièrement approprié pour investiguer le rôle des mécanismes explicites dans l'apprentissage. Toutefois, une critique que l'on peut adresser à l'Etude 3 est de ne pas avoir introduit la tâche secondaire durant toute la durée de l'entraînement. Pour cette raison, la discussion sur la courbe d'apprentissage en relation avec les effets de la condition (simple *versus* double tâche) est problématique dans la mesure où la tâche interférente n'a été introduite que durant les deux premiers essais. Bien sûr, nos résultats permettent d'apporter un éclairage intéressant concernant les mécanismes impliqués en tout début d'apprentissage. Des travaux ultérieurs sont toutefois nécessaires afin de déterminer si la situation de double tâche peut ralentir ou altérer l'apprentissage chez l'enfant.

[3] Une troisième perspective de recherche pourrait être d'investiguer les capacités de *généralisation*. Certaines données de la littérature chez l'adulte suggèrent, en effet, qu'un apprentissage implicite conduit à une performance moins flexible qu'un apprentissage explicite (Dienes & Berry, 1997; Willingham, Nissen, & Bullemer, 1989). A cet égard, Karmiloff-Smith (1992), dans son modèle sur le développement cognitif,

postule que lorsque le comportement de l'enfant est sous-tendu par des connaissances implicites, il est dépendant du contexte et donc, peu flexible. Selon ce point de vue, le développement des connaissances explicites sur les règles régissant la situation cible irait de pair avec un comportement plus flexible permettant une certaine généralisation. Dans l'Etude 2, où nous avons testé les capacités de généralisation d'enfants (de 7 et 10 ans) et d'adultes, en les confrontant à une tâche différente de celle qui a été entraînée, nous n'avons pas mis en évidence de différences dues à l'âge dans les capacités de transfert. Des travaux ultérieurs sont nécessaires en vue de confirmer ce résultat préliminaire.

La mémoire procédurale : quel développement ?

« Infants are not regarded as incomplete or imperfect adults who must “improve” and become more complete with age ; rather, they are viewed merely as nonadults – as different organisms who occupy different ecological niches that pose different sets of problems to solve » (Rovee-Collier & Cuevas, 2009, p. 168).

Les résultats issus des trois études que nous avons conduites dans une perspective développementale sont sans équivoque sur au moins un point : l'acquisition d'une nouvelle habileté procédurale est relativement indépendante de l'âge. En effet, nos données révèlent un taux d'amélioration de la performance au cours des essais d'entraînement, similaire quel que soit l'âge des individus et le type de tâche administrée.

L'idée que les mécanismes d'apprentissage procédural sont efficaces tôt dans le développement peut *tout d'abord* prendre appui sur notre première étude, réalisée à l'aide du paradigme de TRS. Nos résultats ont en effet montré que les enfants âgés entre 4 et 10 ans sont capables d'apprendre une séquence de second ordre (SOC) composée de 8 et de 12 éléments aussi bien que des sujets adultes.

Ensuite, la question du développement de la mémoire procédurale n'avait jamais été posée comme telle avec une tâche de type dessin en miroir. Nos résultats montrent l'absence de différence liée à l'âge dans le taux d'acquisition. Comme nous en avons discuté, ces données suggèrent que l'acquisition d'habiletés procédurales chez l'enfant serait principalement sous-tendue par des *mécanismes implicites*. Il y aurait toutefois un basculement, au cours de l'enfance, dans le recours à des stratégies explicites pour permettre un meilleur contrôle sur la *performance* (plus spécifiquement, sur le contrôle

des erreurs) à des tâches procédurales lorsque l'habileté n'est pas encore automatisée.

Dans le contexte des théories sur le développement cognitif, nos données sont compatibles avec la position théorique adoptée par Karmiloff-Smith (1992) qui attribue un rôle fondamental aux *connaissances implicites* dans la formation de nouveaux comportements. Toutefois, comme nous l'avons abordé dans la partie introductive, Perruchet et Vinter (1998; voir également Vinter & Perruchet, 1994) ont proposé une vision quelque peu différente de celle défendue par Karmiloff-Smith, qui peut également être intéressante pour envisager les phénomènes d'apprentissage chez l'enfant. Ces auteurs rejettent l'idée selon laquelle la capacité de l'enfant à interagir efficacement avec son environnement dépendrait de la mise en place de représentations implicites. Ils proposent que cette aptitude puisse plutôt dépendre de l'action de processus associatifs élémentaires. Selon ce point de vue, l'apprentissage implicite renvoie à un mode d'adaptation dans lequel le comportement de l'enfant est sensible aux régularités présentes dans une situation.

Cette dernière conception nous a amenée à envisager une interprétation alternative à nos résultats. Nous proposons que l'acquisition d'habiletés procédurales puisse renvoyer à un mode d'adaptation dans lequel le comportement de l'enfant se modifie progressivement via le jeu des interactions avec l'environnement, interactions dont la nature dépendra des capacités attentionnelles et exécutives du sujet, ainsi que du développement des fonctions motrices et perceptives.

Statut de la mémoire procédurale dans le TAC

La seconde partie de notre travail s'inscrivait dans une perspective neuropsychologique et visait à explorer l'hypothèse d'un déficit de la mémoire procédurale dans le trouble de l'acquisition de la coordination. Cette idée, initialement proposée par Nicolson et Fawcett (2007), a reçu le support d'un petit nombre d'études comportementales et d'explorations en neuro-imagerie. Avec la tâche de temps de réaction sériel, deux recherches ont mis en évidence un déficit dans l'apprentissage spécifique de la séquence chez les enfants TAC (Gheysen et al., 2011; Mayor-Dubois et al., 2012). Toutefois, comme nous l'avons suggéré (Etude 1), ces résultats pourraient être liés à la modalité de réponse adoptée dans ces études, modalité qui, en raison des troubles moteurs présentés par ces enfants, a interféré avec l'apprentissage spécifique de la séquence. L'utilisation d'un écran tactile réduit les contraintes cognitives et perceptivo-motrices associées à la tâche classique de TRS, ce qui permet à des enfants présentant des troubles moteurs de démontrer un apprentissage séquentiel. Toutefois, des recherches ultérieures, utilisant des séquences déterministes plus complexes ou des séquences probabilistes, permettraient d'étayer notre résultat.

Les données que nous avons obtenues avec la tâche d'adaptation perceptivo-motrice (Etudes 5 et 6) mettent également en évidence un taux d'amélioration au cours des essais d'entraînement similaire entre les enfants TAC et les enfants de contrôle, ce qui est consistant avec certaines données de la littérature (Missiuna, 1994; Revie & Larkin, 1993). Toutefois, les études menées dans ce champ théorique sont très peu nombreuses. Si un certain nombre d'entre elles révèle un bénéfice lors d'un entraînement répété aux activités motrices, il semble qu'il existe, d'une part, une grande variabilité inter-individuelle et, d'autre part, une lenteur persistante parmi les enfants TAC.

A cet égard, nos conclusions, qui révèlent des capacités d'apprentissage procédural préservées dans le TAC, doivent être nuancées, et ce pour deux raisons. D'une part, nous relevons, dans le groupe d'enfants TAC, des particularités dans la performance. En effet, ils restent plus lents ou moins précis que les enfants de contrôle malgré l'entraînement ; les différences mises en évidence en début d'apprentissage ne se dissipent pas avec la pratique de la tâche. D'autre part, les résultats de l'Etude 6 ont

suggéré qu'un sous-groupe d'enfants TAC présentait un déficit d'automatisation des procédures motrices. Nous développons ces deux points de discussion dans les sections suivantes.

Lenteur, manque de précision : quelle en est l'origine ?

Dans l'Etude 5, nous relevons que les enfants TAC sont plus lents que les enfants de contrôle et ce, tout au long de l'entraînement. Dans l'Etude 6, par contre, il n'y avait pas de différence dans les temps d'exécution entre les deux groupes d'enfants. Par contre, les enfants TAC sont moins précis que les enfants de contrôle. Cela pourrait s'expliquer par le fait que la tâche de dessin en miroir présente des caractéristiques qui autorisent les enfants à privilégier la vitesse au détriment de la précision (contrairement à la tâche de souris inversée où aucune erreur n'était possible). En effet, dans la tâche de dessin en miroir, les enfants n'étaient pas interrompus lorsqu'ils sortaient du parcours. Par conséquent, au vu de la difficulté et du caractère répétitif de la tâche, les enfants TAC semblent avoir mis la priorité sur la vitesse d'exécution plutôt que sur la précision⁷⁶.

Toutefois, la lenteur mise en évidence dans l'Etude 5 n'était observée qu'en condition « inversée ». En d'autres termes, les enfants TAC sont aussi rapides que les enfants de contrôle pour manipuler la souris dans sa position habituelle. De la même manière, l'Etude 6 révèle que les enfants TAC sont moins précis que les enfants de contrôle pour réaliser le parcours de l'étoile, mais ce manque de précision était majoré dans la condition avec le miroir en comparaison avec la condition de contrôle (sans le miroir). Ces deux résultats indiquent donc que c'est la condition inversée (ou de miroir) qui perturbe la performance motrice des enfants TAC et non le geste moteur en tant que tel. Plusieurs hypothèses sont envisagées pour expliquer ce manque de précision/lenteur observé chez les enfants TAC.

[1] Un retard développemental ?

Certains auteurs suggèrent que la variabilité des réponses ainsi que la lenteur tendent à disparaître avec l'âge chez les enfants TAC (Greene & Williams, 1993). Le ralentissement (ou le manque de précision) observé durant la tâche procédurale pourrait

⁷⁶ Il est important de noter que l'augmentation de la vitesse d'exécution au cours des essais n'était cependant pas associée avec une augmentation du nombre d'erreurs.

ne pas relever d'un déficit spécifique, mais serait lié au niveau de développement moteur de ces enfants. A cet égard, il aurait été utile d'inclure dans notre échantillon un second groupe contrôle avec des enfants plus jeunes⁷⁷. Afin d'apporter quelques éléments de réponse à cette hypothèse, nous avons réalisé des analyses complémentaires. Nous avons ainsi utilisé une analyse de covariance qui permet de « neutraliser » l'effet de l'âge sur nos résultats. Le point de discussion est de savoir si l'âge des enfants TAC est responsable de la lenteur ou du manque de précision observé tout au long de l'apprentissage. Nos résultats ne confirment pas cette hypothèse. En effet, l'effet du groupe (TAC *versus* contrôle) sur les différents blocs reste significatif même lorsque l'âge des enfants est pris en considération.

[2] Un déficit exécutif ?

Le deuxième point de discussion est de savoir si un manque de contrôle exécutif chez les enfants TAC pourrait être responsable des différences entre les groupes. Comme nous l'avons démontré (Etude 2), les processus exécutifs (et en particulier, l'inhibition) impliqués dans les premières étapes de l'apprentissage procédural permettent un meilleur contrôle sur la performance motrice (et donc, le geste est plus rapide et plus précis). Si des troubles exécutifs sont à l'origine de cette lenteur (ou manque de précision) durant la tâche d'adaptation motrice, les différences de groupe devraient principalement se marquer en début de tâche, mais plus en fin d'apprentissage, comme c'est le cas chez des enfants plus jeunes (Lejeune, Catale, Schmitz, et al., 2013) ou chez des sujets avec pathologie frontale (Richer et al., 1999). Or, ce n'est pas ce que nous observons : les différences de groupe présentes en début d'apprentissage ne se réduisent pas avec la pratique de la tâche. En outre, aucune différence de groupe (TAC *versus* contrôle) n'a été mise en évidence sur un ensemble de tâches évaluant l'inhibition et la flexibilité. Par contre, dans nos deux études, les enfants TAC présentaient des déficits sur le plan de la mémoire de travail, comparativement aux enfants de contrôle. Certains auteurs suggèrent que la mémoire de travail est un déterminant cognitif majeur pour expliquer les différences de groupes dans les deux premières phases de l'apprentissage (Anguera, Reuter-Lorenz, Willingham, & Seidler, 2011). Nous n'avons toutefois pas mis en évidence de corrélations significatives entre la performance à la tâche de mémoire de travail et celle à la tâche procédurale et ce, dans les deux groupes d'enfants (analyses non reprises dans les Etude 5 et 6). Des études ultérieures réalisées sur un plus grand nombre de sujets permettront, peut-être, de mettre en évidence un lien entre ces deux variables.

[3] Un déficit de la fonction cérébelleuse ?

Plusieurs auteurs soutiennent l'hypothèse qu'un déficit de la fonction cérébelleuse serait responsable d'une plus grande variabilité (de même que d'une lenteur) dans la performance motrice des enfants TAC (par exemple, Lundy-Ekman et al., 1991). Les difficultés se marqueraient notamment dans les tâches d'adaptation perceptivo-motrice

⁷⁷ Soulignons toutefois la difficulté qu'il y a de concevoir des outils d'évaluation de la mémoire procédurale qui soient adaptés à de jeunes enfants (comme nous l'avons abordé précédemment).

(Kagerer et al., 2006). En effet, une des fonctions du cervelet est de corriger les erreurs de mouvements afin de faire face aux perturbations de l'environnement. Un dysfonctionnement à ce niveau pourrait alors engendrer des mouvements plus lents ou moins précis. Comme le montrent nos résultats, l'écart avec les enfants de contrôle se marque au moment de l'introduction de la perturbation perceptivo-motrice (miroir ou inversion de la souris), ce qui semble compatible avec l'hypothèse d'un défaut dans les mécanismes qui sous-tendent l'adaptation perceptivo-motrice. Une étude conduite auprès d'enfants présentant une malformation congénitale du cervelet (Edelstein et al., 2004) met en évidence un profil de résultats assez proche du nôtre : le niveau de performance était plus bas chez les enfants du groupe clinique ; par contre, le taux d'apprentissage était identique à celui des enfants de contrôle.

[4] Des stratégies compensatoires ?

Le fait que les enfants TAC soient plus lents (Etude 5) ou commettent plus d'erreurs (Etude 6) peut également suggérer que les processus qui sous-tendent la performance diffèrent par rapport aux sujets de contrôle. En effet, comme nous l'avons vu dans la partie consacrée au développement de la mémoire procédurale, la quantité de ressources engagées durant l'acquisition d'une nouvelle habileté peut avoir un impact sur la performance sans nécessairement avoir d'influence sur le taux d'acquisition. Ainsi, alors que la performance motrice est réalisée avec aisance par le groupe contrôle, les sujets TAC doivent quant à eux fournir plus d'efforts (c'est-à-dire engager davantage de ressources cognitives) pour réaliser la tâche motrice. Une étude en neuro-imagerie (Zwicker et al., 2010) démontre que les enfants TAC activent deux fois plus de régions cérébrales que les enfants de contrôle durant la réalisation d'une tâche motrice. Afin d'étayer cette hypothèse, nous avons comparé les corrélations entre la performance motrice et les fonctions exécutives entre nos deux groupes d'enfants (Etudes 5 et 6). Nous nous attendions à ce que les enfants TAC engagent plus de ressources cognitives (en particulier les fonctions exécutives) durant toute la durée de l'entraînement, y compris dans la phase dite d'automatisation. Ces analyses supplémentaires (non reprises dans les Etudes 5 et 6), qui comparent les coefficients de corrélation, n'ont hélas pas permis de mettre en évidence des différences dans la quantité (ou le type) de processus engagés durant la réalisation de la tâche procédurale. Les résultats de l'Etude 6 nous apportent toutefois quelques éléments de réponse (voir la section suivante).

Toutes ces hypothèses constituent des pistes de réflexion pour de futurs travaux. Il semble primordial d'identifier à l'avenir l'origine de cette lenteur (ou manque de précision) qui caractérise la performance motrice des enfants TAC dans certaines situations. En outre, nous ne pouvons exclure la possibilité que les enfants TAC auraient pu rattraper la performance de leurs pairs s'ils avaient pu bénéficier d'essais d'apprentissage supplémentaires. Il pourrait être intéressant d'augmenter le nombre de

blocs d'apprentissage afin de déterminer si ce facteur permet aux enfants TAC d'améliorer leur performance quantitative ou qualitative.

Un déficit d'automatisation à l'origine des troubles chez les enfants TAC ?

Pour rappel, l'automatisation d'une nouvelle habileté procédurale se développe graduellement à la suite d'une quantité importante de pratique. Le caractère automatique est généralement démontré par le fait que la performance ne dépend plus de la disponibilité des ressources attentionnelles ; l'habileté peut alors être réalisée aisément, en même temps qu'une autre tâche (Chauvel et al., 2012). Dans l'Etude 6, nous avons émis l'idée que les enfants TAC compenseraient des troubles dans les processus automatiques par le recrutement intensif de processus contrôlés, qui sont plus coûteux en ressources attentionnelles. Cette hypothèse, qui a également été formulée dans d'autres troubles du développement chez l'enfant (Gidley Larson & Mostofsky, 2008; Lum et al., 2013), apparaît particulièrement pertinente dans le cadre du TAC. En effet, les observations cliniques de ces enfants mettent clairement en évidence des difficultés pour automatiser les gestes de la vie quotidienne (écrire, boutonner sa chemise, nouer ses lacets, ...). Sur le plan comportemental, dans une expérience qui consistait à rester en équilibre sur une planche, Tsai et al. (2009) ont montré que l'introduction d'une tâche cognitive interférente affectait la performance motrice ; l'effet d'interférence était toutefois plus marqué chez les enfants TAC que chez les enfants de contrôle. Selon les auteurs, ce résultat suggère que les traitements cognitifs sous-jacents à la performance motrice nécessitent davantage de ressources attentionnelles chez les enfants TAC que chez les enfants sans trouble. Plus généralement, l'exécution d'une habileté motrice pourrait être moins automatique pour ces enfants. En appui à cette hypothèse, une sous-activation dans les circuits cortico-cérébelleux, qui sont impliqués dans les phases dites « lente » et « d'automatisation » de l'apprentissage (Doyon et al., 2003), a été démontrée chez des enfants TAC lors de la réalisation d'une tâche motrice censée être automatisée (Zwicker et al., 2011).

Si les données que nous avons obtenues (Etude 6) ne permettent pas de confirmer cette hypothèse, elles ne permettent pas non plus de la rejeter totalement. En effet, des analyses individuelles mettent en évidence que 33 % des enfants TAC présentent une diminution significative des performances à la tâche principale, résultant de

l'introduction de la tâche interférente, ce qui peut refléter un déficit d'automatisation de la tâche de dessin en miroir par rapport aux autres enfants. L'analyse de leur performance au cours de la phase d'acquisition montre que ces 5 enfants étaient, en général, moins précis (c'est-à-dire qu'ils commettaient plus d'erreurs) que les 10 autres enfants TAC⁷⁸. Ces performances plus faibles au cours de l'apprentissage peuvent, au moins en partie, être expliquées par une difficulté à automatiser le geste moteur. Dans l'ensemble, nos données rejoignent notamment celles obtenues par Cantin et al. (2007) et par Lord et Hulme (1988) qui montrent que seul un sous-groupe d'enfants TAC présente respectivement une dysfonction cérébelleuse et des difficultés à développer des programmes moteurs. Ils sont également congruents avec l'hétérogénéité connue dans la population d'enfants TAC.

Hétérogénéité, comorbidité : comment s'en sortir ?

Sur le plan clinique, nous pouvons souligner une nouvelle fois la grande hétérogénéité des troubles présentés par les enfants TAC. Du fait de cette variabilité, les études de groupe, qui incluent souvent peu d'enfants et de larges tranches d'âge, peuvent masquer une partie des difficultés. Comme nous l'avons vu dans l'Etude 6, à l'instar d'autres recherches (Brookes et al., 2007; Mayor-Dubois et al., 2012), seules des analyses individuelles révèlent des difficultés chez certains enfants. Au fil de l'évolution de notre réflexion, nous avons ainsi été amenée à penser que le déficit de la mémoire procédurale pourrait ne pas être la cause unique qui rend compte de l'ensemble des difficultés chez les enfants TAC. Cette hypothèse pourrait seulement être pertinente pour un sous-groupe d'enfants présentant ce diagnostic.

Par ailleurs, le TAC pur est rare et présente une comorbidité fréquente, particulièrement avec le TDAH et les troubles de l'apprentissage (voir par exemple, Kaplan et al., 1998). Dans notre échantillon, la présence de troubles associés était bien évidemment un critère d'exclusion, mais uniquement sur base de questionnaires complétés par les parents. Un examen plus approfondi, notamment au niveau du langage, aurait peut-être permis de distinguer certains profils d'enfants au vu de la fréquente comorbidité entre les deux troubles.

⁷⁸ Nous relevons également un indice d'apprentissage moins élevé parmi ces 5 enfants. Ces différences correspondaient à une taille d'effet importante selon les conventions de N. J. Cohen et Squire (1980).

Ces éléments d'hétérogénéité et de comorbidité compliquent évidemment l'identification des mécanismes à l'origine du trouble. Toutefois, plutôt que d'y voir un frein potentiel à nos recherches, la comorbidité peut au contraire nous donner l'opportunité de tester l'hypothèse du déficit de la mémoire procédurale. En effet, cette idée a initialement été formulée par Nicolson et Fawcett (2007) pour rendre compte de la coexistence fréquente entre les différents troubles du développement chez l'enfant. Ces auteurs postulent que le déficit de mémoire procédurale est un des éléments explicatifs de cette comorbidité. Selon ce point de vue, il est probable que les enfants TAC présentent effectivement un déficit dans les processus d'automatisation, mais celui-ci pourrait être compensé par le recours à des stratégies explicites. Par contre, lorsque le TAC est associé à d'autres troubles du développement (comme par exemple, la dyslexie ou la dysphasie), le déficit de mémoire procédurale pourrait alors être plus évident. De façon surprenante, bien que l'hypothèse d'un déficit d'automatisation soit commune aux différents troubles du développement, elle a systématiquement été étudiée de manière séparée dans chacune de ces populations. Seule l'étude de Mayor-Dubois et al. (2012) a tenté de déterminer dans quelle mesure des enfants dysphasiques avec ou sans TAC associé présentaient des profils différents d'apprentissage procédural. Cette analyse par sous-groupe d'enfants dysphasiques a permis de montrer que seuls les enfants qui présentent le double diagnostic ont un déficit de l'apprentissage procédural perceptivo-moteur. Cette étude ouvre ainsi la voie vers la recherche d'explications concernant les symptômes comorbides dans la dysphasie et le TAC.

A cette hétérogénéité inhérente aux troubles du développement chez l'enfant vient également se greffer l'hétérogénéité qui caractérise les situations d'apprentissage procédural. L'acquisition d'habiletés regroupe, en effet, des situations très différentes d'apprentissage. Comme nous l'avons déjà souligné, les mécanismes impliqués dans l'apprentissage diffèrent également en fonction des situations d'apprentissage et des capacités cognitives des apprenants. Des recherches ultérieures, incluant d'autres situations d'apprentissage procédural ainsi que des enfants plus jeunes, semblent nécessaires pour étayer nos résultats.

Le TAC selon la théorie de l'apprentissage moteur : vers une étiologie multiple ?

L'idée qu'un déficit unique (par exemple, touchant la mémoire procédurale) puisse suffire à rendre compte de toutes les difficultés rencontrées dans le trouble de l'acquisition de la coordination apparaît, à bien des égards, utopique. Il est, en effet, plus cohérent de considérer que les enfants atteints de TAC peuvent présenter des troubles de nature différente.

Sur ce point, la théorie de l'apprentissage moteur, proposée initialement par Willingham (1998) et reprise par Ahonen et al. (2004) dans le cadre du TAC (voir page 86), représente un modèle assez prometteur pour de futures recherches. Ce modèle offre, en effet, la possibilité de situer les problèmes rencontrés par l'enfant à différents niveaux. Par exemple, les difficultés d'apprentissage moteur pourraient être dues à des troubles [1] dans les processus stratégiques (sous la dépendance du cortex frontal dorsolatéral ; par exemple, difficultés de planification), [2] dans les processus d'intégration perceptivo-motrice (sous la dépendance du cortex pariétal ; par exemple des troubles visuo-spatiaux), ou encore [3] dans les processus de timing (sous la dépendance du cervelet ; par exemple, lenteur dans les mouvements).

Ainsi, une approche plus individualisée, incluant une analyse cognitive et comportementale approfondie et recueillant des informations liées à la comorbidité, permettrait peut-être de mieux approcher la complexité et la variabilité des difficultés présentées par les enfants TAC. Il se peut qu'en multipliant des études de cas approfondies (qui testent les différentes hypothèses en regard d'un modèle théorique), on aboutisse à une réelle compréhension du trouble de l'acquisition de la coordination. Enfin, des études longitudinales semblent également pertinentes afin de tester l'évolution des déficits présentés par ces enfants.

Perspectives et implications cliniques

La recherche d'un déficit de mémoire procédurale dans le TAC en est encore à ses débuts et ne permet pas de tirer des conclusions définitives quant à la préservation versus l'altération de ces mécanismes. Les origines du TAC restent encore à découvrir,

mais une poursuite de l'investigation des capacités d'automatisation dans ce groupe d'enfants semble à la fois pertinente et nécessaire.

Dans le cadre d'un projet thérapeutique, une des questions fréquemment posée concerne le bénéfice d'un entraînement répété. Un enfant qui écrit mal devrait-il être entraîné à ce mouvement afin de « rattraper son retard » ? Nos données indiquent que les enfants TAC peuvent bénéficier d'un apprentissage moteur spécifique. Toutefois, de nombreuses questions persistent quant aux mécanismes impliqués durant l'acquisition et quant aux possibilités d'automatisation (mais aussi de généralisation) de l'habileté acquise. Dans les milieux cliniques, les approches thérapeutiques « orientées sur la tâche », qui visent à entraîner une habileté motrice spécifique, sont généralement peu recommandées car, même si la réussite peut être atteinte pour une habileté spécifique, les progrès ne se généralisent pas. Dans notre expérience (Étude 5), nous avons montré un certain transfert de l'habileté de souris inversée à une situation différente de celle qui avait fait l'objet d'un entraînement. Toutefois, ce résultat apparaît bien insuffisant pour réellement statuer sur les capacités de généralisation des enfants TAC. Cette question est pourtant primordiale dans un contexte de prise en charge.

Actuellement, bien qu'il existe peu de preuves scientifiques, les stratégies explicites de verbalisation (telles que l'auto-guidage verbal) sont généralement privilégiées pour soutenir les enfants TAC dans leurs apprentissages moteurs. Dans ce contexte, une perspective de recherche intéressante pourrait être d'explorer le bénéfice d'une telle méthode plus « explicite » en comparaison à une méthode d'apprentissage plus « implicite » (par exemple, dans une condition d'apprentissage sans erreur; voir Maxwell et al., 2001). Il semble en effet nécessaire d'identifier les conditions d'apprentissage qui favorisent l'acquisition d'une nouvelle habileté chez ces enfants. A cet égard, une étude non publiée présentée par Maxwell, Masters et Hammond (2008, cité par Capio, Sit, Abernethy, & Masters, 2012) lors d'une conférence internationale suggère que la réduction des erreurs pendant l'apprentissage moteur (en commençant par des situations simples) pourrait être particulièrement bénéfique pour les enfants ayant de faibles capacités motrices. Cette méthode permet non seulement de minimiser le recours à des traitements cognitifs contrôlés (tels que la mémoire de

travail qui est souvent altérée chez ces enfants), mais également d'éviter de confronter les enfants à des échecs répétés. En effet, les situations d'apprentissage moteur peuvent d'emblée décourager les enfants TAC, qui se sentent moins performants que leurs pairs dans ce type de situation. Commencer par leur proposer des situations très simples d'apprentissage moteur permettrait peut-être à ces enfants de connaître le succès et leur donnerait un peu de confiance dans leurs capacités motrices. Ils pourraient ainsi aborder ces situations avec moins d'appréhension. Cet aspect, davantage d'ordre psychoaffectif et motivationnel, pourrait être un des arguments en faveur des méthodes d'apprentissage sans erreur.

Enfin, de façon plus indirecte, ce travail souligne l'importance qu'il y a d'aménager l'environnement de l'enfant souffrant d'un trouble de l'acquisition de la coordination. Il ressort en effet de l'Etude 4 que la sélection d'un mode de réponse adapté a permis aux enfants TAC d'obtenir des performances motrices équivalentes à celles de leurs pairs.

INTERETS ET LIMITES DES EPREUVES PROCEDURALES

La tâche de temps de réaction sériel

Classiquement, dans une tâche de TRS, les sujets doivent répondre en positionnant l'index et le majeur de chaque main sur les touches du clavier qui correspondent spatialement aux positions des cibles sur l'écran (le plus souvent, quatre cibles sont positionnées en ligne). Ainsi, pour effectuer correctement ce type de tâche, le sujet doit montrer une certaine aisance dans l'utilisation du clavier. Ce dispositif implique également d'apprendre une association entre la position de la cible sur l'écran (le stimulus) et la touche réponse correspondante (la réponse). Comme nous l'avons évoqué dans la partie introductive, des études récentes montrent que la procédure classique associée à la tâche de TRS peut représenter une charge cognitive et/ou motrice pour de jeunes enfants ou pour des enfants présentant des troubles moteurs (Gabriel et al., 2012; Thomas & Nelson, 2001).

Ainsi, pour limiter la composante motrice et éviter le balayage visuel entre ce que l'enfant voit à l'écran et la réponse qu'il doit fournir sur le clavier de l'ordinateur, nous avons opté pour l'utilisation d'un écran tactile comme mode de réponse. Les résultats

de notre première étude montrent que ce type de matériel est adapté pour les enfants d'âge préscolaire puisqu'ils apprenaient la séquence d'apprentissage (composée de 8 ou de 12 éléments) aussi bien que des enfants plus âgés et que des adultes. En outre, le pourcentage de réponses correctes était très élevé (dépassant les 90%). Thomas et Nelson (2001), qui sont les seuls (outre notre propre étude) à tester des enfants de 4 ans, avaient également adapté le dispositif de réponse afin d'en faciliter la manipulation. Toutefois, alors que dans leur étude 28% des enfants de 4 ans (soit 11 enfants) n'ont pas montré un apprentissage spécifique de la séquence, ce taux est réduit à 16% (5 enfants sur 32) dans notre échantillon. Une critique que l'on peut également adresser à l'étude de Thomas et Nelson concerne le fait qu'ils n'aient pas utilisé le même dispositif de réponse pour tous les participants⁷⁹, ce qui rend difficile les comparaisons intergroupes.

Concernant les enfants TAC, nos résultats montrent clairement l'avantage de l'écran tactile puisqu'ils ont démontré un apprentissage spécifique de la séquence (Etude 4) alors que des difficultés avaient été mises en évidence avec un périphérique de réponse plus classique (Gheysen et al., 2011) En offrant une cible plus accessible⁸⁰, les enfants TAC parvenaient à répondre aussi rapidement aux stimuli que les enfants de contrôle. Cet outil représente donc une réelle alternative pour évaluer les capacités d'apprentissage de séquences chez ces enfants.



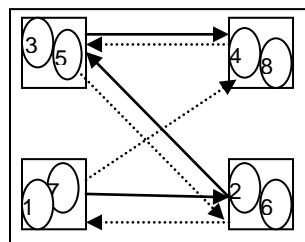
Afin de garder les enfants motivés, l'épreuve a été élaborée à l'aide d'un support attractif. Le décor est inspiré des histoires d'Harry Potter (voir l'illustration ci-contre). La mission des participants consistait à délivrer les sept amis d'Harry Potter. Pour ce faire, ils devaient « attraper » (en les touchant avec l'index) les « méchants » qui apparaissaient dans une des quatre fenêtres du château. A la fin de chaque bloc, l'enfant était récompensé par la libération d'un personnage.

Enfin, dans une tâche classique de TRS, le sujet apprend une association « position à l'écran – doigt » alors que, dans la version que nous avons créée, le sujet acquiert une séquence de mouvements effectuée directement sur l'écran d'ordinateur (voir

⁷⁹ Pour rappel, une présentation en carré des stimuli était utilisée pour les enfants de 4 ans (alors qu'une présentation linéaire était utilisée pour les enfants de 7 et de 10 ans), et le boîtier-réponse pour les enfants de 4 ans était plus grand que pour les deux autres groupes d'enfants.

⁸⁰ Toucher la cible à l'écran constitue en effet un mode réponse moins sensible aux difficultés de motricité fine présentées par ces enfants que la réponse habituelle via le clavier de l'ordinateur.

l'illustration ci-dessous). Une question que l'on peut légitimement se poser est de



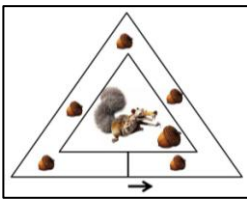
savoir si la séquence des localisations à l'écran *versus* la séquence de réponses effectuées sur le clavier relève du même apprentissage. Chez l'adulte, Chambaron, Ginjac et Perruchet (2008) testent l'influence du périphérique de réponse sur l'apprentissage (en comparant clavier *versus* souris d'ordinateur). Leurs résultats ont montré que les

participants apprennent les régularités présentes dans la séquence de la même manière quand ils utilisent un clavier ou une souris. Par ailleurs, les résultats obtenus par Gabriel et al. (2012), avec un clavier d'ordinateur *versus* un écran tactile auprès d'enfants vont également dans ce sens. Par conséquent, le périphérique ne semble pas avoir d'influence sur l'apprentissage dans une tâche de TRS.

La tâche de souris inversée

Les épreuves classiques de mémoire procédurale sont généralement peu attractives pour les enfants. La nature du matériel, mais également le fait que l'enfant doit réaliser la même tâche durant une période prolongée, participent au caractère fastidieux voire parfois rebutant de ce type d'épreuve. Dans ces conditions, l'enfant peut se décourager au fil des essais, ou même refuser de poursuivre la séance. Nous voulions ainsi proposer une tâche d'adaptation perceptivo-motrice accessible aux plus jeunes, tout en gardant une sensibilité suffisante pour mesurer la performance d'enfants d'âges plus avancés. Nous avons ainsi adapté la tâche de souris inversée initialement conçue pour tester des sujets adultes (Merbah, Lejeune, & Meulemans, 2010)⁸¹. Nous avons élargi l'espace entre les deux traits noirs (1,7 cm au lieu de 1,2 cm). Nous avons également placé des personnages de dessins animés tout au long du parcours (voir l'illustration page suivante) en vue de rendre la tâche plus amusante.

⁸¹ Les sujets devaient tracer le contour d'une figure géométrique (triangle, étoile) sur un écran d'ordinateur à l'aide d'une souris placée en position inversée (retournement de 180°). Les participants avaient pour consigne de parcourir la forme en maintenant le curseur de la souris dans une zone délimitée par deux traits noirs. Dans le cas où le curseur sortait de ces limites, une marque rouge apparaissait à cet endroit, et le sujet devait alors repositionner le curseur de la souris à l'endroit où il était sorti afin de poursuivre la tâche.



Le sujet avait pour mission de collecter un maximum d'objets qu'il rencontrait sur son chemin afin d'aider un personnage). Les objets étaient répartis sur le parcours de telle sorte que les enfants les attrapaient automatiquement sur leur passage. A la fin de chaque essai, les enfants étaient récompensés par un message (« Tu es vraiment fort ! ») et ils étaient également informés de leur prochaine mission (la nature de celle-ci changeait à chaque essai).

La tâche était généralement appréciée par les enfants. Au-delà de son caractère ludique, elle comporte plusieurs atouts. *Premièrement*, le matériel nécessaire est restreint (un ordinateur portable ainsi qu'une souris sans fil), ce qui permet d'envisager son utilisation dans un contexte clinique. *Deuxièmement*, la mesure du temps total de réalisation et du nombre d'erreurs est précise.

Deux limites inhérentes à cette tâche doivent toutefois être soulignées.

Tout d'abord, l'expertise préalable dans le maniement de la souris à l'endroit constitue un facteur susceptible d'influencer les performances. Nous pourrions ainsi imaginer que plus un individu est habile pour manipuler la souris à l'endroit, plus il sera habile avec la souris à l'envers. Toutefois, l'hypothèse inverse est également tout à fait envisageable : le degré d'expertise dans le maniement à l'endroit pourrait avoir une influence négative sur le maniement à l'envers de la souris dans la mesure où le sujet doit inhiber un comportement moteur fortement automatisé. Dans l'Étude 1, même si nous avons veillé à ce que tous les participants (7 ans, 10 ans, adultes) aient une utilisation régulière de la souris d'ordinateur, le degré d'automatisation de celle-ci était différent⁸². Nous avons ainsi testé, avec des analyses corrélationnelles et de covariance, l'influence de ces différences initiales dans le maniement de la souris sur la performance au premier bloc de la tâche de souris inversée. Les résultats ne mettent en évidence aucun lien significatif entre la vitesse de manipulation de la souris à l'endroit et celle de la souris inversée. Dès lors, le degré d'expertise dans l'utilisation de la souris à l'endroit n'explique pas les divergences de résultats entre nos trois groupes de sujets lors du premier bloc d'apprentissage. D'autres variables, comme par exemple les processus exécutifs, sont plus susceptibles de rendre compte des performances en début d'apprentissage. Par ailleurs, dans l'Étude 4, les résultats montrent que les

⁸² Pour rappel, nos résultats mettaient en évidence que les enfants de 7 ans étaient plus lents que les enfants de 10 ans pour manipuler la souris. Une amélioration plus modérée était également observée entre les enfants de 10 ans et les adultes.

enfants TAC ne sont pas plus lents pour manipuler la souris d'ordinateur dans sa position habituelle, alors qu'une nette différence est révélée lors du passage à la condition inversée. Sur base de ces deux études, bien qu'on ne puisse totalement rejeter le fait que le maniement de la souris puisse avoir une certaine influence sur les performances des enfants, elle ne semble pas constituer le facteur principal susceptible de déterminer les performances en début d'apprentissage dans la condition inversée.

Une *deuxième* difficulté soulevée dans le cadre de ce travail est que la tâche de souris inversée était souvent perçue par les enfants comme étant très complexe ; ceux-ci montraient parfois des signes de découragement durant les premiers essais. Dans ces conditions, il a souvent été nécessaire d'encourager les enfants, particulièrement les enfants les plus jeunes et les enfants TAC. L'aspect ludique de la tâche a été un atout essentiel pour les remotiver après un essai qui avait été particulièrement laborieux. Par contre, au fil des essais, les enfants devenaient de plus en plus habiles dans le maniement de la souris, ce qui les encourageait à poursuivre.

Pour les enfants TAC, nous avons opté pour une version simplifiée de la tâche de souris inversée pour la phase d'entraînement car l'épreuve du triangle s'est avérée trop complexe pour eux et les décourageait dès le départ.



La tâche consistait à aller chercher, à l'aide de la souris, différents personnages apparaissant sur l'écran d'ordinateur et à les placer dans une « corbeille » située au bas de l'écran (voir l'illustration ci-contre). L'avantage de cette épreuve est que les sujets pouvaient faire de larges mouvements, lesquels n'étaient pas pénalisés.

La tâche de dessin en miroir

Bien que la tâche procédurale de souris inversée comporte plusieurs avantages, cette épreuve, dans laquelle les relations visuo-motrices sont retournées à 180°, est totalement inhabituelle. Quelques travaux ont montré que les jeunes enfants pouvaient avoir des difficultés à réaliser des rotations mentales (Tahej et al., 2012). A cet égard, la tâche de dessin en miroir « classique » est plus écologique dans la mesure où les situations de miroir nous sont familières (dès notre plus jeune âge, nous avons pris l'habitude de nous coiffer les cheveux ou de nous brosser les dents face à un miroir).

La tâche classique de dessin en miroir (Gabrieli et al., 1993) a été modifiée afin qu'elle soit accessible aux enfants les plus jeunes. En référence aux quelques études

réalisées chez l'enfant (Prehn-Kristensen et al., 2009; Vicari et al., 2005), nous avons opté pour une étoile à cinq pointes avec un interligne égal à 1 cm (voir l'illustration ci-dessous). Afin que tous les enfants soient à l'aise dans le tracé du parcours, chacun était libre de choisir son stylo habituel.



Le thème de la tâche est celui du dessin animé « Cars ». Les enfants ont pour consigne de tracer le trajet complet de l'étoile le plus rapidement possible, en restant à l'intérieur des lignes du parcours. Aucune aide de la part de l'examineur n'est permise, hormis le repositionnement si nécessaire de la main de l'enfant à l'endroit où il s'est arrêté.

La tâche modifiée semble pertinente en raison, d'une part, de son aspect écologique et, d'autre part, du degré de complexité qu'elle revêt pour les enfants. En effet, la tâche s'est avérée assez complexe pour des enfants de 10 ans qui ont montré une amélioration de leur performance motrice tant sur le plan de la vitesse qu'au niveau de la précision (Etude 3). Cette tâche s'est également avérée accessible à des enfants de 7 ans ainsi qu'aux enfants souffrant de troubles moteurs (Etudes 3 et 6). Deux limites inhérentes à cette tâche doivent toutefois être soulignées. *Premièrement*, la réalisation des premières figures a exigé une forte présence de l'examineur (notamment, pour repositionner la main de l'enfant à l'endroit où il s'est arrêté et pour veiller à ce que chaque segment de l'étoile soit parcouru). *Deuxièmement*, l'application des critères de cotation des erreurs fut très laborieuse (certaines figures étaient difficiles à corriger, l'enfant étant passé un grand nombre de fois sur un même segment de l'étoile). A cet égard, l'utilisation de la tâche de souris inversée était plus avantageuse puisqu'elle offrait des mesures précises tout en laissant à l'enfant plus d'autonomie puisque, quand il commettait une erreur, l'endroit où il devait repositionner le curseur était indiqué par un carré rouge.

En utilisant cette tâche dans l'Etude 3 et 6, nous voulions également nous assurer que les résultats que nous avons obtenus avec la tâche de souris inversée (Etudes 2 et 4) pouvaient être généralisés à d'autres tâches d'adaptation motrice telles que le dessin en miroir. Les résultats atteints avec la tâche de dessin en miroir sont assez consistants avec ceux obtenus avec l'épreuve de souris inversée, ce qui suggère que ces épreuves semblent, malgré quelques critiques, relativement adaptées pour évaluer les capacités d'apprentissage procédural perceptivo-moteur chez l'enfant.

CONCLUSION

Les résultats que nous avons obtenus apportent des éléments de réponse dans un champ de la neuropsychologie du développement qui a été très peu exploré : la mémoire procédurale.

Dans la littérature, l'approche « top-down » est la plus répandue. Toutefois, quelques travaux proposent des visions alternatives (« bottom-up »), en démontrant que l'apprentissage d'une nouvelle habileté peut être sous-tendu par des mécanismes implicites dès le début de l'apprentissage. Dans ce travail de thèse, nous souhaitons confronter les résultats de nos études chez l'enfant à ces deux modèles théoriques. L'originalité de notre travail était d'explorer le rôle joué par les mécanismes explicites dans la formation de nouvelles habiletés, à différentes étapes du développement cognitif de l'enfant.

Nos résultats révèlent que l'apprentissage procédural chez l'enfant est principalement sous-tendu par des *mécanismes implicites*. Ceux-ci sont relativement indépendants de l'âge. Ces données sont compatibles avec les conceptions « bottom-up » et plus particulièrement, avec celles qui suggèrent que les mécanismes implicites et explicites agissent *en parallèle* dès le début de l'apprentissage. Si elles sont suffisamment développées, les stratégies explicites permettent un meilleur contrôle de la performance motrice en début d'apprentissage. Toutefois, les résultats obtenus chez les enfants les plus jeunes suggèrent que l'intervention de ces processus de contrôle ne serait pas une condition nécessaire à l'acquisition de l'habileté en tant que telle. De futures recherches devront s'atteler à confirmer et compléter les premiers résultats obtenus dans ce champ de la neuropsychologie du développement.

La seconde partie de notre travail s'inscrivait dans une perspective neuropsychologique et visait à explorer l'hypothèse d'un déficit de la mémoire procédurale dans le trouble de l'acquisition de la coordination (TAC). Nos résultats indiquent que les capacités d'apprentissage procédural sont globalement préservées dans le TAC. Nous relevons toutefois des particularités dans la performance des enfants TAC : ils restent, malgré

l'entraînement, plus lents ou moins précis que les enfants de contrôle. A cet égard, nos données offrent des pistes intéressantes à investiguer, dont l'automatisation des habiletés procédurales qui semble être problématique chez certains enfants.

Actuellement, l'étiologie du TAC reste encore à découvrir. Au fil de l'évolution de notre réflexion, nous avons ainsi été amenée à penser que le déficit de la mémoire procédurale pourrait ne pas être la cause unique qui rende compte de l'ensemble des difficultés chez les enfants TAC. Ce déficit pourrait n'être présent que dans un sous-groupe d'enfants présentant ce diagnostic. Une approche plus individualisée, incluant une analyse cognitive et comportementale approfondie et recueillant des informations liées à la comorbidité, permettrait peut-être de mieux approcher la complexité et la spécificité des difficultés présentées par les enfants TAC. La théorie de l'apprentissage moteur, proposée initialement par Willingham (1998) et reprise par Ahonen et al. (2004) dans le cadre du TAC, ouvre à cet égard une voie de recherche intéressante.

Dans une perspective de prise en charge, nous avons également souligné l'intérêt qu'il y a à explorer la mémoire procédurale, notamment en vue d'identifier les conditions d'apprentissage qui favorisent l'acquisition d'une nouvelle habileté chez ces enfants.

Enfin, de façon plus indirecte, ce travail souligne l'importance d'inclure une évaluation de la mémoire procédurale dans le bilan neuropsychologique. Une meilleure connaissance des éventuels troubles en cause lors de l'acquisition d'une nouvelle habileté pourrait permettre de mieux orienter la prise en charge de l'enfant TAC, qui reste à l'heure actuelle peu spécifique.

BIBLIOGRAPHIE

- Abernethy, B. (1988). Dual-task methodology and motor skills research: Some applications and methodological constraints. *Journal of Human Movement Studies*, 14, 101-132.
- Ackerman, P. L. (1988). Determinants of individual differences during skill acquisition: Cognitive abilities and information processing. *Journal of Experimental Psychology: General*, 117, 288-318.
- Ackerman, P. L., & Cianciolo, A. T. (2000). Cognitive, perceptual-speed, and psychomotor determinants of individual differences during skill acquisition. *Journal of Experimental Psychology*, 6, 259-290.
- Ahonen, T., Kooistra, L., Viholainen, H., & Cantell, M. (2004). Developmental motor learning disability: A neuropsychological approach. In D. Dewey & D. E. Tupper (Eds.), *Developmental motor disorders: A neuropsychological perspective* (pp. 265-290). New York, NY: The Guilford Press.
- Albaret, J.-M., Carayre, S., Soppelsa, R., & Michelon, Y. (1995). Hétérogénéité des dyspraxies de développement: Tentative de classification. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant*, 7, 61-67.
- Albaret, J.-M., & Chaix, Y. (2011). Trouble de l'acquisition de la coordination: Bases neurobiologiques et aspects neurophysiologiques. *Clinical Neurophysiology*, 42, 11-17.
- Alloway, T. P. (2007). Working memory, reading, and mathematical skills in children with developmental coordination disorder. *Journal of Experimental Child Psychology*, 96, 20-36.
- Alloway, T. P., Rajendran, G., & Archibald, L. M. D. (2009). Working Memory in Children With Developmental Disorders. *Journal of Learning Disabilities*, 42, 372-382.
- American Psychiatric Association (2000). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders, Fourth edition, Texte revision (DSM-IV-TR)*. Washington, DC: American Psychiatric Association.
- Anderson, J. R. (1982). Acquisition of cognitive skill. *Psychological Review*, 89, 369-406.
- Anderson, V. A., & Lajoie, G. (1996). Developmental memory and learning skills in school-aged children: A neuropsychological perspective. *Appl Neuropsychol*, 3, 128-139.
- Anguera, J. A., Reuter-Lorenz, P. A., Willingham, D. T., & Seidler, R. D. (2010). Contributions of spatial working memory to visuomotor learning. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22, 1917-1930.
- Anguera, J. A., Reuter-Lorenz, P. A., Willingham, D. T., & Seidler, R. D. (2011). Failure to engage spatial working memory contributes to age-related declines in visuomotor learning. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23, 11-25.

- Anguera, J. A., Russell, C. A., Noll, D. C., & Seidler, R. D. (2007). Neural correlates associated with intermanual transfer of sensorimotor adaptation. *Brain Research, 1185*, 136-151.
- Ayres, A. J. (1972). *Sensory integration and learning disabilities*. Los Angeles, CA: Western Psychological Services.
- Baddeley, A. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Science, 4*, 417-423.
- Barnes, K. A., Howard, J. H., Howard, D. V., Gilotty, L., Kenworthy, L., Gaillard, W. D., & Vaidya, C. J. (2008). Intact implicit learning of spatial context and temporal sequences in childhood autism spectrum disorder. *Neuropsychology, 22*, 563-570.
- Barnes, K. A., Howard, J. H., Howard, D. V., Kenealy, L., & Vaidya, C. J. (2010). Two Forms of Implicit Learning in Childhood ADHD. *Developmental Neuropsychology, 35*, 494-505.
- Bauer, P. J. (2005). Developments in declarative memory decreasing susceptibility to storage failure over the second year of life. *Psychological Science, 16*, 41-47.
- Bauer, P. J. (2007). Recall in Infancy A Neurodevelopmental Account. *Current Directions in Psychological Science, 16*, 142-146.
- Beaunieux, H., Eustache, F., Busson, P., De La Sayette, V., Viader, F., & Desgranges, B. (2012). Cognitive procedural learning in early Alzheimer's disease: Impaired processes and compensatory mechanisms. *Journal of Neuropsychology, 6*, 31-42.
- Beaunieux, H., Hubert, V., Pitel, A. L., Desgranges, B., & Eustache, F. (2009). Episodic memory deficits slow down the dynamics of cognitive procedural learning in normal ageing. *Memory, 17*, 197-207.
- Beaunieux, H., Hubert, V., Witkowski, T., Pitel, A.-L., Rossi, S., Danion, J.-M., . . . Eustache, F. (2006). Which processes are involved in cognitive procedural learning? *Memory, 14*, 521-539.
- Bernard, J. A., & Seidler, R. D. (2013). Cerebellar contributions to visuomotor adaptation and motor sequence learning: An ALE meta-analysis. *Frontiers in human neuroscience, 7*, 1-13.
- Berquin, P., Querne, L., & Vernier-Hauvette, M. P. (2010). Dyspraxies et trouble d'acquisition de la coordination. In S. Chokron & J.-F. Démonet (Eds.), *Approche neuropsychologique des troubles des apprentissages* (pp. 189-196). Marseille, France: Solal.
- Blank, R., Smits-Engelsman, B., Polatajko, H., & Wilson, P. H. (2012). European Academy for Childhood Disability (EACD): recommendations on the definition, diagnosis and intervention of developmental coordination disorder (long version). *Developmental Medicine and Child Neurology, 54*, 54-93.

- Bo, J., Contreras-Vidal, J. L., Kagerer, F. A., & Clark, J. E. (2006). Effects of increased complexity of visuo-motor transformations on children's arm movements. *Human Movement Science, 25*, 553-567.
- Bo, J., & Lee, C. M. (2013). Motor skill learning in children with Developmental Coordination Disorder. *Research in Developmental Disabilities, 34*, 2047-2055.
- Bond, J. M., & Morris, M. (2000). Goal-directed secondary motor tasks: their effects on gait in subjects with Parkinson disease. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 81*, 110-116.
- Bremner, A. J., Mareschal, D., Destrebecqz, A., & Cleeremans, A. (2007). Cognitive Control of Sequential Knowledge in 2-Year-Olds Evidence From an Incidental Sequence-Learning and-Generation Task. *Psychological Science, 18*, 261-266.
- Broadbent, D. E. (1977). Levels, hierarchies, and the locus of control. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 29*, 181-201.
- Brocki, K. C., & Bohlin, G. (2004). Executive functions in children aged 6 to 13: a dimensional and developmental study. *Developmental Neuropsychology, 26*, 571-593.
- Brookes, R. L., Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (2007). Prisms throw light on developmental disorders. *Neuropsychologia, 45*, 1921-1930.
- Brosseau, J., Potvin, M.-J., & Rouleau, I. (2007). Aging affects motor skill learning when the task requires inhibitory control. *Developmental Neuropsychology, 32*, 597-613.
- Brown, J., Aczel, B., Jiménez, L., Kaufman, S. B., & Grant, K. P. (2010). Intact implicit learning in autism spectrum conditions. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 63*, 1789-1812.
- Canfield, R. L., & Haith, M. M. (1991). Young infants' visual expectations for symmetric and asymmetric stimulus sequences. *Developmental Psychology, 27*, 198-208.
- Cantell, M., & Kooistra, L. (2002). Long-term outcomes of developmental coordination disorder. In S. A. Cermak & D. Larkin (Eds.), *Developmental coordination disorder: Theory and practice* (pp. 23-38). Albany, NY: Delmar Thomson Learning.
- Cantell, M., Smyth, M. S., & Ahonen, T. P. (2003). Two distinct pathways for developmental coordination disorder: Persistence and resolution. *Human Movement Science, 22*, 413-431.
- Cantin, N., Polatajko, H. J., Thach, W. T., & Jaglal, S. (2007). Developmental coordination disorder: Exploration of a cerebellar hypothesis. *Human Movement Science, 26*, 491-509.

- Capio, C. M., Sit, C. H., Abernethy, B., & Masters, R. S. W. (2012). The possible benefits of reduced errors in the motor skills acquisition of children. *Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation, Therapy & Technology*, 4, 1-4.
- Casey, B., Galvan, A., & Hare, T. A. (2005). Changes in cerebral functional organization during cognitive development. *Current Opinion in Neurobiology*, 15, 239-244.
- Catale, C. (2010). *Le fonctionnement exécutif chez l'enfant: Approche développementale et neuropsychologique*. (unpublished doctoral dissertation). Retrieved from <http://orbi.ulg.ac.be/>
- Catale, C., Germain, S., & Meulemans, T. (2011). Exploration of perceptive and motor inhibition in children with traumatic brain injury. *Perceptual and Motor Skills*, 112, 667-679.
- Cermak, S. A., & Larkin, D. (2001). *Developmental coordination disorder*. Albany, NY: Delmar.
- Chambaran, S., Ginjac, D., & Perruchet, P. (2008). gSRT-Soft: a generic software application and some methodological guidelines to investigate implicit learning through visual-motor sequential tasks. *Behavior Research Methods*, 40, 493-502.
- Chauvel, G., Maquestiaux, F., Hartley, A. A., Joubert, S., Didierjean, A., & Masters, R. S. W. (2012). Age effects shrink when motor learning is predominantly supported by nondeclarative, automatic memory processes: Evidence from golf putting. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 65, 25-38.
- Cherng, R. J., Liang, L. Y., Chen, Y. J., & Chen, J. Y. (2009). The effects of a motor and a cognitive concurrent task on walking in children with developmental coordination disorder. *Gait and Posture*, 29, 204-207.
- Cherry, K. E., & Stadler, M. A. (1995). Implicit learning of a nonverbal sequence in younger and older adults. *Psychology and Aging*, 10, 379-394.
- Chouinard, M. J., Rouleau, I., & Richer, F. (1998). Closed-loop sensorimotor control and acquisition after lesions. *Brain and Cognition*, 37, 178-182.
- Cleeremans, A., & Dienes, Z. (2008). Computational models of implicit learning. In R. Sun (Ed.), *The Cambridge Handbook of Computational Psychology* (pp. 396-421). New York, NY: Cambridge University Press.
- Cleeremans, A., & Jiménez, L. (1998). Implicit sequence learning: The truth is in the details. In M. A. Stadler & P. A. Frensch (Eds.), *Handbook of implicit learning* (pp. 323-364). Thousand Oaks, CA: Sage Publications.
- Clohessy, A. B., Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (2001). Development of the functional visual field. *Acta Psychologica*, 106, 51-68.

- Cohen, A., Ivry, R. I., & Keele, S. W. (1990). Attention and structure in sequence learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *16*, 17-30.
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences 2nd ed.* Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Cohen, J. (1992). A power primer. *Psychological Bulletin*, *112*, 155-159.
- Cohen, N. J., & Squire, L. R. (1980). Preserved learning and retention of pattern-analyzing skill in amnesia: Dissociation of knowing how and knowing that. *Science*, *210*, 207-210.
- Contreras-Vidal, J. L., Bo, J., Boudreau, J. P., & Clark, J. E. (2005). Development of visuomotor representations for hand movement in young children. *Experimental Brain Research*, *162*, 155-164.
- Contreras-Vidal, J. L., & Buch, E. R. (2003). Effects of Parkinson's disease on visuomotor adaptation. *Experimental Brain Research*, *150*, 25-32.
- Curran, T. (1997). Effects of aging on implicit sequence learning: Accounting for sequence structure and explicit knowledge. *Psychological Research*, *60*, 24-41.
- De Guise, E., Del Pesce, M., Foschi, N., Quattrini, A., Papo, I., & Lassonde, M. (1999). Callosal and cortical contribution to procedural learning. *Brain*, 1049-1062.
- De Guise, E., & Lassonde, M. (2001). Callosal contribution to procedural learning in children. *Developmental Neuropsychology*, *19*, 253-272.
- De Haan, M., Mishkin, M., Baldeweg, T., & Vargha-Khadem, F. (2006). Human memory development and its dysfunction after early hippocampal injury. *Trends in Neurosciences*, *29*, 374-381.
- Debrabant, J., Gheysen, F., Caeyenberghs, K., Van Waelvelde, H., & Vingerhoets, G. (2013). Neural underpinnings of impaired predictive motor timing in children with Developmental Coordination Disorder. *Research in Developmental Disabilities*, *34*, 1478-1487.
- Deiber, M.-P., Wise, S., Honda, M., Catalan, M., Grafman, J., & Hallett, M. (1997). Frontal and parietal networks for conditional motor learning: A positron emission tomography study. *Journal of Neurophysiology*, *78*, 977-991.
- Dekaban, A. S. (1977). Tables of cranial and orbital measurements, cranial volume, and derived indexes in males and females from 7 days to 20 years of age. *Annals of Neurology*, *2*, 485-491.
- Deroost, N., Zeischka, P., Coomansa, D., Bouazzaa, S., Depessemerb, P., & Soetensa, E. (2010). Intact first- and second-order implicit sequence learning in secondary-school-aged children with developmental dyslexia. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *32*, 561-572.

- Destrebecqz, A., & Cleeremans, A. (2001). Can sequence learning be implicit? New evidence with the process dissociation procedure. *Psychonomic Bulletin & Review*, 8, 343-350.
- Destrebecqz, A., Peigneux, P., Laureys, S., Degueldre, C., Del Fiore, G., Aerts, J., . . . Maquet, P. (2005). The neural correlates of implicit and explicit sequence learning: Interacting networks revealed by the process dissociation procedure. *Learning and Memory*, 12, 480-490.
- Diamond, A. (1991). Neuropsychological insights into the meaning of object concept development. In S. Carey & R. Gelman (Eds.), *The epigenesis of mind: Essays on biology and knowledge* (pp. 67-110). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Diamond, A., & Taylor, C. (1996). Development of an aspect of executive control: Development of the abilities to remember what I said and to "Do as I say, not as I do". *Developmental Psychobiology*, 29, 315-334.
- Dienes, Z., & Berry, D. (1997). Implicit learning: Below the subjective threshold. *Psychonomic Bulletin & Review*, 4, 3-23.
- Dobbing, J., & Sands, J. (1973). Quantitative growth and development of human brain. *Archives of Disease in Childhood*, 48, 757-767.
- Doyon, J., Bellec, P., Amsel, R., Penhune, V., Monchi, O., Carrier, J., . . . Benali, H. (2009). Contributions of the basal ganglia and functionally related brain structures to motor learning. *Behavioural Brain Research*, 199, 61-75.
- Doyon, J., & Benali, H. (2005). Reorganization and plasticity in the adult brain during learning of motor skills. *Current Opinion in Neurobiology*, 15, 161-167.
- Doyon, J., Gaudreau, D., Laforce, R., Jr., Castonguay, M., Bedard, P. J., Bedard, F., & Bouchard, J. P. (1997). Role of the striatum, cerebellum, and frontal lobes in the learning of a visuomotor sequence. *Brain and Cognition*, 34, 218-245.
- Doyon, J., Orban, P., Barakat, M., Debas, K., Lungu, O., Albouy, G., . . . Benali, H. (2011). Functional brain plasticity associated with motor learning. *Médecine sciences*, 27, 413-420.
- Doyon, J., Penhune, V., & Ungerleider, L. G. (2003). Distinct contribution of the cortico-striatal and cortico-cerebellar systems to motor skill learning. *Neuropsychologia*, 41, 252-262.
- Doyon, J., & Ungerleider, L. (2002). *Functional anatomy of motor skill learning*. New York: The Guilford Press.
- Dugas, M., Albert, E., Halfon, O., & Nedey-Sayag, M. C. (1987). *L'hyperactivité chez l'enfant*. Paris, France: Presses Universitaires de France.

- Edelstein, K., Dennis, M., Copeland, K., Frederick, J., Francis, D., Hetherington, R., . . . Fletcher, J. M. (2004). Motor learning in children with spina bifida: Dissociation between performance level and acquisition rate. *Journal of the International Neuropsychological Society, 10*, 877-887.
- Eliez, S., & Schaer, M. (2009). Aspects macroscopiques de la maturation normale et pathologique du cerveau humain de la naissance à l'âge adulte. In M. Poncelet, S. Majerus & M. Van der Linden (Eds.), *Traité de neuropsychologie de l'enfant* (pp. 13-27). Marseille, France: Solal.
- Eustache, F., & Desgranges, B. (2003). Concepts et modèles en neuropsychologie de la mémoire: Entre théorie et pratique clinique. In T. Meulemans, B. Desgranges, S. Adam & F. Eustache (Eds.), *Evaluation et Prise en Charge des Troubles Mnésiques* (pp. 13-49). Marseille, France: Solal.
- Eversheim, U., & Bock, O. (2001). Evidence for processing stages in skill acquisition: A dual-task study. *Learning and Memory, 8*, 183-189.
- Fawcett, A. J., & Nicolson, R. I. (1992). Automatisation deficits in balance for dyslexic children. *Perceptual and Motor Skills, 75*, 507-529.
- Fawcett, A. J., Nicolson, R. I., & Dean, P. (1996). Impaired performance of children with dyslexia on a range of cerebellar tasks. *Annals of Dyslexia, 46*, 259-283.
- Ferrel-Chapus, C., Hay, L., Olivier, I., Bard, C., & Fleury, M. (2002). Visuomanual coordination in childhood: adaptation to visual distortion. *Experimental Brain Research, 144*, 506-517.
- Fitts, P. M. (1964). Perceptual-motor skill learning. In A. W. Melton (Ed.), *Categories of human learning* (pp. 243-285). New York, NY: Academic Press.
- Fletcher, P. C., Zafiris, O., Frith, C., Honey, R., Corlett, P., Zilles, K., & Fink, G. (2005). On the benefits of not trying: Brain activity and connectivity reflecting the interactions of explicit and implicit sequence learning. *Cerebral Cortex, 15*, 1002-1015.
- Foerde, K., Knowlton, B. J., & Poldrack, R. A. (2006). Modulation of competing memory systems by distraction. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 103*, 11778-11783.
- Francks, C., Fisher, S. E., Marlow, A. J., MacPhie, I. L., Taylor, K. E., Richardson, A. J., . . . Monaco, A. P. (2003). Familial and genetic effects on motor coordination, laterality, and reading-related cognition. *American Journal of Psychiatry, 160*, 1970-1977.
- Frensch, P. A., Buchner, A., & Lin, J. (1994). Implicit learning of unique and ambiguous serial transitions in the presence and absence of a distractor task. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 20*, 567-584.

- Gabay, Y., Schiff, R., & Vakil, E. (2012). Dissociation between the procedural learning of letter names and motor sequences in developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, *50*, 2435-2441.
- Gabriel, A., Maillart, C., Guillaume, M., Stefaniak, N., & Meulemans, T. (2011). Exploration of serial structure procedural learning in children with language impairment. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *17*, 336-343.
- Gabriel, A., Maillart, C., Stefaniak, N., Lejeune, C., Desmottes, L., & Meulemans, T. (2013). Procedural Learning in Specific Language Impairment: Effects of Sequence Complexity. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *19*, 264-271.
- Gabriel, A., Stefaniak, N., Maillart, C., Schmitz, X., & Meulemans, T. (2012). Procedural visual learning in children with specific language impairment. *American Journal of Speech-Language Pathology*.
- Gabrieli, J. D., Corkin, S., Mickel, S. F., & Growdon, J. H. (1993). Intact acquisition and long-term retention of mirror-tracing skill in Alzheimer's disease and in global amnesia. *Behavioral Neuroscience*, *107*, 899-910.
- Gabrieli, J. D., Stebbins, G. T., Singh, J., Willingham, D. B., & Goetz, C. G. (1997). Intact mirror-tracing and impaired rotary-pursuit skill learning in patients with Huntington's disease: Evidence for dissociable memory systems in skill learning. *Neuropsychology*, *11*, 272-281.
- Gentile, A. M. (1998). Implicit and explicit processes during acquisition of functional skills. *Scandinavian Journal of Occupational Therapy*, *16*, 7-16.
- Gentili, R. J., Bradberry, T. J., Oh, H., Hatfield, B. D., & Contreras Vidal, J. L. (2011). Cerebral cortical dynamics during visuomotor transformation: Adaptation to a cognitive-motor executive challenge. *Psychophysiology*, *48*, 813-824.
- Germain, S., & Collette, F. (2008). Dissociation of perceptual and motor inhibitory processes in young and elderly participants using the Simon task. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *14*, 1014-1021.
- Geuze, R. H. (2005a). *Le trouble de l'acquisition de la coordination: évaluation et rééducation de la maladresse chez l'enfant*. Marseille, France: Solal.
- Geuze, R. H. (2005b). Postural control in children with developmental coordination disorder. *Neural Plasticity*, *12*, 183-196.
- Geuze, R. H., Jongmans, M. J., Schoemaker, M., Smits Engelsman, B. C., & Bouwien, C. M. (2001). Clinical and research diagnostic criteria for developmental coordination disorder: A review and discussion. *Human Movement Science*, *20*, 7-47.
- Gheysen, F., Van Waelvelde, H. D., & Fias, W. (2011). Impaired visuo-motor sequence learning in Developmental Coordination Disorder. *Research in Developmental Disabilities*, *32*, 749-756.

- Gibbs, J., Appleton, J., & Appleton, R. (2007). Dyspraxia or developmental coordination disorder? Unravelling the enigma. *Archives of Disease in Childhood, 92*, 534-539.
- Gidley Larson, J., & Mostofsky, S. H. (2008). Evidence that the pattern of visuomotor sequence learning is altered in children with autism. *Autism Research, 1*, 341-353.
- Giedd, J. N. (2004). Structural magnetic resonance imaging of the adolescent brain. *Annals of the New York Academy of Sciences, 1021*, 77-85.
- Giedd, J. N., Blumenthal, J., Jeffries, N. O., Castellanos, F. X., Liu, H., Zijdenbos, A., . . . Rapoport, J. L. (1999). Brain development during childhood and adolescence: A longitudinal MRI study. *Nature Neuroscience, 2*, 861-863.
- Giedd, J. N., Snell, J. W., Lange, N., Rajapakse, J. C., Casey, B., Kozuch, P. L., . . . Kaysen, D. (1996). Quantitative magnetic resonance imaging of human brain development: Ages 4–18. *Cerebral Cortex, 6*, 551-559.
- Gilger, J. W., & Kaplan, B. J. (2001). Atypical brain development: A conceptual framework for understanding developmental learning disabilities. *Developmental Neuropsychology, 20*, 465-481.
- Gillberg, C., & Kadesjo, B. (2000). Attention-deficit/hyperactivity disorder and developmental coordination disorder. In T. E. Brown (Ed.), *Attention-deficit disorders and comorbidities in children, adolescents, and adults* (pp. 393-406). Washington, DC: American Psychiatric Publishing, Inc.
- Goodgold-Edwards, S. A., & Cermak, S. A. (1990). Integrating motor control and motor learning concepts with neuropsychological perspectives on apraxia and developmental dyspraxia. *American Journal of Occupational Therapy, 44*, 431-439.
- Gordon, B., & Stark, S. (2007). Procedural learning of a visual sequence in individuals with autism. *Focus on Autism and Other Developmental Disabilities, 22*, 14-22.
- Goyette, C. H., Conners, C. K., & Ulrich, R. F. (1978). Normative data on revised Conners Parent and Teacher Rating Scales. *Journal of Abnormal Child Psychology, 6*, 221-236.
- Graf, P., & Schacter, D. L. (1985). Implicit and explicit memory for new associations in normal and amnesic subjects. *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition, 11*, 501-518.
- Greene, L. S., & Williams, H. G. (1993). Age-related differences in timing control of repetitive movement: Application of the Wing-Kristofferson model. *Research Quarterly for Exercise and Sport, 64*, 32-39.
- Griffiths, P., Wilkinson, I., Variend, S., Jones, A., Paley, M., & Whitby, E. (2004). Differential growth rates of the cerebellum and posterior fossa assessed by post mortem magnetic resonance imaging of the fetus: Implications for the pathogenesis of the chiari 2 deformity. *Acta Radiologica, 45*, 236-242.

- Guillery-Girard, B., Quinette, P., Piolino, P., Desgranges, B., & Eustache, F. (2008). Mémoire et fonctions exécutives. In B. Lechevalier, F. Eustache & F. Viader (Eds.), *Traité de neuropsychologie clinique: Neurosciences cognitives et cliniques de l'adulte*. Bruxelles, Belgique: De Boek.
- Haith, M. M., & Mccarty, M. E. (1990). Stability of Visual Expectations at 3.0 Months of Age. *Developmental Psychology, 26*, 68-74.
- Halsband, U., & Lange, R. K. (2006). Motor learning in man: A review of functional and clinical studies. *Journal of Physiology-Paris, 99*, 414-424.
- Hands, B. P., & Larkin, D. (2001). Developmental coordination disorder: A discrete disability. *New Zealand Journal of Disability Studies, 9*, 93-105.
- Hardwick, R. M., Rottschy, C., Miall, R. C., & Eickhoff, S. B. (2012). A quantitative meta-analysis and review of motor learning in the human brain. *Neuroimage, 67*, 283-297.
- Harnishfeger, K. K. (1995). The development of cognitive inhibition: Theories, definitions, and research evidence. In F. N. Dempster & C. J. Brainerd (Eds.), *Interference and inhibition in cognition* (pp. 175-204). San Diego, CA: Academic Press.
- Helmuth, L. L., Mayr, U., & Daum, I. (2000). Sequence learning in Parkinson's disease: a comparison of spatial-attention and number-response sequences. *Neuropsychologia, 38*, 1443-1451.
- Henderson, S. E., & Henderson, L. (2003). Toward an understanding of developmental coordination disorder: terminological and diagnostic issues. *Neural Plast, 10*, 1-13.
- Henderson, S. E., & Sugden, D. A. (1992). *The Movement Assessment Battery for Children*. San Antonio, TX: The Psychological Corporation.
- Hikosaka, O., Nakahara, H., Rand, M. K., Sakai, K., Lu, X., Nakamura, K., . . . Doya, K. (1999). Parallel neural networks for learning sequential procedures. *Trends in Neurosciences, 22*, 464-471.
- Hoare, D. (1994). Subtypes of developmental coordination disorder. *Adapted Physical Activity Quarterly, 11*, 158-169.
- Howard, D. V., & Howard, J. H. (1989). Age differences in learning serial patterns: Direct versus indirect measures. *Psychology and Aging, 4*, 357-364.
- Howard, D. V., & Howard, J. H. (2001). When it does hurt to try: Adult age differences in the effects of instructions on implicit pattern learning. *Psychonomic Bulletin & Review, 8*, 798-805.
- Howard, J. H., Jr., Howard, D. V., Japikse, K. C., & Eden, G. F. (2006). Dyslexics are impaired on implicit higher-order sequence learning, but not on implicit spatial context learning. *Neuropsychologia, 44*, 1131-1144.

- Huizinga, M., Dolan, C. V., & van der Molen, M. W. (2006). Age-related change in executive function: Developmental trends and a latent variable analysis. *Neuropsychologia*, *44*, 2017-2036.
- Huizinga, M., & van der Molen, M. W. (2007). Age-group differences in set-switching and set-maintenance on the Wisconsin Card Sorting Task. *Developmental Neuropsychology*, *31*, 193-215.
- Huttenlocher, P. R., & Dabholkar, A. S. (1997). Regional differences in synaptogenesis in human cerebral cortex. *Journal of Comparative Neurology*, *387*, 167-178.
- Jacobs, R., Anderson, V., & Harvey, S. (2001). Concept generation test as a measure of conceptual reasoning skills in children: Examination of developmental trends. *Clinical Neuropsychological Assessment*, *2*, 101-117.
- Jenkins, I. H., Brooks, D. J., Nixon, P. D., Frackowiak, R. S., & Passingham, R. E. (1994). Motor sequence learning: A study with positron emission tomography. *The journal of neuroscience*, *14*, 3775-3790.
- Jernigan, T. L., Bellugi, U., Sowell, E., Doherty, S., & Hesselink, J. R. (1993). Cerebral morphologic distinctions between Williams and Down syndromes. *Archives of Neurology*, *50*, 186-191.
- Jiménez, L. (2003). Attention in probabilistic sequence learning. *Advances in Consciousness Research*, *48*, 43-68.
- Jiménez, L., & Méndez, C. (1999). Which attention is needed for implicit sequence learning? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *25*, 236-259.
- Jonkman, L. M. (2006). The development of preparation, conflict monitoring and inhibition from early childhood to young adulthood: a Go/Nogo ERP study. *Brain Research*, *1097*, 181-193.
- Kagerer, F. A., Bo, J., Contreras-Vidal, J. L., & Clark, J. E. (2004). Visuomotor adaptation in children with developmental coordination disorder. *Motor Control*, *8*, 450-460.
- Kagerer, F. A., Contreras-Vidal, J. L., Bo, J., & Clark, J. E. (2006). Abrupt, but not gradual visuomotor distortion facilitates adaptation in children with developmental coordination disorder. *Human Movement Science*, *25*, 622-633.
- Kaplan, B. J., Dewey, D. M., Crawford, S. G., & Wilson, B. N. (2001). The term comorbidity is of questionable value in reference to developmental disorders data and theory. *Journal of Learning Disabilities*, *34*, 555-565.
- Kaplan, B. J., Wilson, B. N., Dewey, D., & Crawford, S. G. (1998). DCD may not be a discrete disorder. *Human Movement Science*, *17*, 471-490.

- Karatekin, C., Marcus, D. J., & White, T. (2007). Oculomotor and manual indexes of incidental and intentional spatial sequence learning during middle childhood and adolescence. *Journal of Experimental Child Psychology, 96*, 107-130.
- Karmiloff-Smith, A. (1992). *Beyond modularity: A developmental perspective on cognitive science*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Karni, A., Meyer, G. P., J., M., A. M., R., T., & Ungerleider, L. G. (1995). Functional MRI evidence for adult motor cortex plasticity during motor skill learning. *Nature, 377*, 155-158.
- Kashiwagi, M., Iwaki, S., Narumi, Y., Tamai, H., & Suzuki, S. (2009). Parietal dysfunction in developmental coordination disorder: A functional MRI study. *Neuroreport, 20*, 1319-1324.
- Katschmarsky, S., Cairney, S., Maruff, P., Wilson, P. H., & Currie, J. (2001). The ability to execute saccades on the basis of efference copy: Impairments in double-step saccade performance in children with developmental coordination disorder. *Experimental Brain Research, 136*, 73-78.
- Kennedy, K. M., Partridge, T., & Raz, N. (2008). Age-related differences in acquisition of perceptual-motor skills: Working memory as a mediator. *Aging, Neuropsychology, and Cognition, 15*, 165-183.
- Kennedy, K. M., & Raz, N. (2005). Age, sex and regional brain volumes predict perceptual-motor skill acquisition. *Cortex, 41*, 560-569.
- King, B. R., Fogel, S. M., Albouy, G., & Doyon, J. (2013). Neural correlates of the age-related changes in motor sequence learning and motor adaptation in older adults. *Frontiers in human neuroscience, 7*, 1-13.
- Knickmeyer, R. C., Gouttard, S., Kang, C., Evans, D., Wilber, K., Smith, J. K., . . . Gilmore, J. H. (2008). A structural MRI study of human brain development from birth to 2 years. *The journal of neuroscience, 28*, 12176-12182.
- Knuckey, N. W., Apsimon, T. T., & Gubbay, S. S. (1983). Computerized axial tomography in clumsy children with developmental apraxia and agnosia. *Brain and Development, 5*, 14-19.
- Kourkoulou, A., Leekam, S. R., & Findlay, J. M. (2012). Implicit learning of local context in autism spectrum disorder. *Journal of Autism and Developmental Disorders, 42*, 244-256.
- Laforce, R., & Doyon, J. (2002). Differential role for the striatum and cerebellum in response to novel movements using a motor learning paradigm. *Neuropsychologia, 40*, 512-517.
- Langan, J., & Seidler, R. D. (2011). Age differences in spatial working memory contributions to visuomotor adaptation and transfer. *Behavioural Brain Research, 225*, 160-168.

- Lejeune, C., Catale, C., Schmitz, X., & Meulemans, T. (2013). Age-related differences in procedural learning of a perceptuomotor skill in children. *Journal of Experimental Child Psychology, 116*, 157-168.
- Lejeune, C., Catale, C., Willems, S., & Meulemans, T. (2013). Intact procedural motor sequence learning in developmental coordination disorder. *Research in Developmental Disabilities, 34*, 1974-1981.
- Lenroot, R. K., & Giedd, J. N. (2006). Brain development in children and adolescents: Insights from anatomical magnetic resonance imaging. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 30*, 718-729.
- Levin, H. S., Culhane, K. A., Hartmann, J., Evankovich, K., Mattson, A. J., Harward, H., . . . Fletcher, J. M. (1991). Developmental changes in performance on tests of purported frontal lobe functioning. *Developmental Neuropsychology, 7*, 377-395.
- Liao, C. M., & Masters, R. S. W. (2001). Analogy learning: A means to implicit motor learning. *Journal of Sports Sciences, 19*, 307-319.
- Lingam, R., Hunt, L., Golding, J., Jongmans, M., & Emond, A. (2009). Prevalence of developmental coordination disorder using the DSM-IV at 7 years of age: A UK population-based study. *Pediatrics, 123*, 693-700.
- Liston, C., & Kagan, J. (2002). Brain development: Memory enhancement in early childhood. *Nature, 419*, 896-896.
- Lord, R., & Hulme, C. (1988). Patterns of rotary pursuit performance in clumsy and normal children. *Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines, 29*, 691-701.
- Luciana, M., Conklin, H. M., Hooper, C. J., & Yarger, R. S. (2005). The development of nonverbal working memory and executive control processes in adolescents. *Child Development, 76*, 697-712.
- Luciana, M., & Nelson, C. A. (1998). The functional emergence of prefrontally-guided working memory systems in four- to eight-year old children. *Neuropsychologia, 36*, 273-293.
- Lum, J. A., Conti-Ramsden, G., Page, D., & Ullman, M. T. (2012). Working, declarative and procedural memory in specific language impairment. *Cortex, 48*, 1138-1154.
- Lum, J. A., Kidd, E., Davis, S., & Conti-Ramsden, G. (2009). Longitudinal study of declarative and procedural memory in primary school-aged children. *Australian Journal of Psychology, iFirst*, 1-10.
- Lum, J. A., Ullman, M. T., & Conti-Ramsden, G. (2013). Procedural learning is impaired in dyslexia: Evidence from a meta-analysis of serial reaction time studies. *Research in Developmental Disabilities, 34*, 3460-3476.

- Lundy-Ekman, L., Ivry, R., Keele, S., & Woollacott, M. (1991). Timing and force control deficits in clumsy children. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *3*, 367-376.
- Magalhaes, L. C., Missiuna, C., & Wong, S. (2006). Terminology used in research reports of developmental coordination disorder. *Developmental Medicine and Child Neurology*, *48*, 937-941.
- Mandich, A., Buckolz, E., & Polatajko, H. (2002). On the ability of children with developmental coordination disorder (DCD) to inhibit response initiation: The simon effect. *Brain and Cognition*, *50*, 150-162.
- Marchiori, G. E., Wall, A. E., & Bedingfield, E. W. (1987). Kinematic analysis of skill acquisition in physically awkward boys. *Adapted Physical Activity Quarterly*, *4*, 305-315.
- Marien, P., Wackenier, P., De Surgeloose, D., De Deyn, P. P., & Verhoeven, J. (2010). Developmental coordination disorder: Disruption of the cerebello-cerebral network evidenced by SPECT. *Cerebellum*, *9*, 405-410.
- Marsh, R., Alexander, G. M., Packard, M. G., Zhu, H., & Peterson, B. S. (2005). Perceptual-motor skill learning in Gilles de la Tourette syndrome. Evidence for multiple procedural learning and memory systems. *Neuropsychologia*, *43*, 1456-1465.
- Martin, N. C., Piek, J. P., & Hay, D. (2006). DCD and ADHD: a genetic study of their shared aetiology. *Human Movement Science*, *25*, 110-124.
- Maruff, P., Wilson, P. H., Trebilcock, M., & Currie, J. (1999). Abnormalities of imaged motor sequences in children with developmental coordination disorder. *Neuropsychologia*, *37*, 1317-1324.
- Masters, R. S. W. (1992). Knowledge, knerves and know-how: The role of explicit versus implicit knowledge in the breakdown of a complex motor skill under pressure. *British Journal of Psychology*, *83*, 343-358.
- Masters, R. S. W., & Maxwell, J. P. (2004). Implicit motor learning, reinvestment and movement disruption: What you don't know won't hurt you? In A. M. Williams & N. J. Hodges (Eds.), *Skill acquisition in sport: Research, theory and practice* (pp. 207-228). London, UK: Routledge.
- Masters, R. S. W., & Poolton, J. M. (2012). Advances in implicit motor learning. In N. J. Hodges & A. M. Williams (Eds.), *Skill acquisition in sport: Research, theory and practice (2nd ed)* (pp. 59-75). London: Routledge.
- Maxwell, J. P., Masters, R., & Hammond, J. (2008). *Interactions between implicit/explicit learning and fundamental movement ability in children*. Paper presented at the 13th European College of Sports Science Annual Congress; 9-12 July 2008; Estoril, Portugal.

- Maxwell, J. P., Masters, R. S. W., & Eves, F. F. (2003). The role of working memory in motor learning and performance. *Consciousness and Cognition, 12*, 376-402.
- Maxwell, J. P., Masters, R. S. W., Kerr, E., & Weedon, E. (2001). The implicit benefit of learning without errors. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 54*, 1049-1068.
- Mayo, J., & Eigsti, I.-M. (2012). Brief Report: A Comparison of Statistical Learning in School-Aged Children with High Functioning Autism and Typically Developing Peers. *Journal of Autism and Developmental Disorders, 42*, 2476-2485.
- Mayor-Dubois, C., Maeder, P., Zesiger, P., & Roulet-Perez, E. (2010). Visuo-motor and cognitive procedural learning in children with basal ganglia pathology. *Neuropsychologia, 48*, 2009-2017.
- Mayor-Dubois, C., Zesiger, P., Van der Linden, M., & Roulet-Perez, E. (2012). Nondeclarative learning in children with Specific Language Impairment: Predicting regularities in the visuomotor, phonological, and cognitive domains. *Child Neuropsychology, iFirst*, 1-9.
- Mazeau, M. (2006). Historique et évolution de la notion de dyspraxie. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant, 88-89*, 143-150.
- McLaughlin, N. C., Paul, R. H., Grieve, S. M., Williams, L. M., Laidlaw, D., DiCarlo, M., . . . Whitford, T. J. (2007). Diffusion tensor imaging of the corpus callosum: A cross-sectional study across the lifespan. *International Journal of Developmental Neuroscience, 25*, 215-221.
- Meier, B., Weiermann, B., Gutbrod, K., Stephan, M. A., Cock, J., Müri, R. M., & Kaelin-Lang, A. (in press). Implicit task sequence learning in patients with Parkinson's disease, frontal lesions and amnesia: The critical role of fronto-striatal loops. *Neuropsychologia*.
- Menghini, D., Di Paola, M., Murri, R., Costanzo, F., Caltagirone, C., Vicari, S., & Petrosini, L. (2013). Cerebellar vermis abnormalities and cognitive functions in individuals with Williams syndrome. *Research in Developmental Disabilities, 34*, 2118-2126.
- Merbah, S., Lejeune, C., & Meulemans, T. (2010). No practice schedule effect on an inverted mouse tracing learning task (unpublished work).
- Meulemans, T. (1997). *L'apprentissage implicite: Une approche cognitive, neuropsychologique et développementale*. Marseille, France: Solal.
- Meulemans, T. (2000). Neuropsychologie de la mémoire implicite et de la mémoire procédurale. *Revue de Neuropsychologie, 10*, 128-158.
- Meulemans, T., Van der Linden, M., & Perruchet, P. (1998). Implicit sequence learning in children. *Journal of Experimental Child Psychology, 69*, 199-221.

- Missiuna, C. (1994). Motor skill acquisition on children with developmental coordination disorder. *Adapted Physical Activity Quarterly*, *11*, 214-235.
- Miyahara, M., Piek, J., & Barrett, N. (2006). Accuracy of drawing in a dual-task and resistance-to-distraction study: motor or attention deficit? *Human Movement Science*, *25*, 100-109.
- 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*, 49-100.
- Mon-Williams, M. A., Wann, J. P., & Pascal, E. (1999). Visual–proprioceptive mapping in children with developmental coordination disorder. *Developmental Medicine and Child Neurology*, *41*, 247-254.
- Mostofsky, S. H., Goldberg, M. C., Landa, R. J., & Denckla, M. B. (2000). Evidence for a deficit in procedural learning in children and adolescents with autism: Implications for cerebellar contribution. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *6*, 752-759.
- Mullen, R., Hardy, L., & Oldham, A. (2007). Implicit and explicit control of motor actions: Revisiting some early evidence. *British Journal of Psychology*, *98*, 141-156.
- Nassauer, K. W., & Halperin, J. M. (2003). Dissociation of perceptual and motor inhibition processes through the use of novel computerized conflict tasks. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *9*, 25-30.
- Nelson, C. A. (1995). The ontogeny of human memory: A cognitive neuroscience perspective. *Developmental Psychology*, *31*, 723-738.
- Nelson, C. A., Thomas, K. M., & De Haan, M. (2006). Neural bases of cognitive development. In D. Kuhn & R. Siegler (Eds.), *Handbook of child psychology: Cognition, perception, and language* (6th ed., pp. 3-57). New York, NY: John Wiley & Sons.
- Nelson, C. A., & Webb, S. J. (2003). A cognitive neuroscience perspective on early memory development. In M. de Haan & M. H. Johnson (Eds.), *The cognitive neuroscience of development* (pp. 99-125). New York, NY: Psychology Press.
- Nicolson, R. I., & Fawcett, A. (1990). Automaticity: A new framework for dyslexia research? *Cognition*, *35*, 159-182.
- Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (2007). Procedural learning difficulties: Reuniting the developmental disorders? *Trends in Neurosciences*, *30*, 135-141.
- Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (2011). Dyslexia, dysgraphia, procedural learning and the cerebellum. *Cortex*, *47*, 117-127.

- Nicolson, R. I., Fawcett, A. J., Berry, E. L., Jenkins, I. H., Dean, P., & Brooks, D. J. (1999). Association of abnormal cerebellar activation with motor learning difficulties in dyslexic adults. *The Lancet*, *353*, 1662-1667.
- Nicolson, R. I., Fawcett, A. J., & Dean, P. (2001). Dyslexia, development and the cerebellum. *Trends in Neurosciences*, *24*, 515-516.
- Nissen, M. J., & Bullemer, P. (1987). Attentional requirements of learning: Evidence from performance measures. *Cognitive Psychology*, *19*, 1-32.
- Ofen, N., Kao, Y.-C., Sokol-Hessner, P., Kim, H., Whitfield-Gabrieli, S., & Gabrieli, J. D. (2007). Development of the declarative memory system in the human brain. *Nature Neuroscience*, *10*, 1198-1205.
- Orban, P., Lungu, O., & Doyon, J. (2008). Motor sequence learning and developmental dyslexia. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1145*, 151-172.
- Ostergaard, A. (1987). Episodic, semantic and procedural memory in a case of amnesia at an early age. *Neuropsychologia*, *25*, 341-357.
- Packard, M. G., & Knowlton, B. J. (2002). Learning and memory functions of the basal ganglia. *Annual Review of Neuroscience*, *25*, 563-593.
- Pascual-Leone, A., Grafman, J., Clark, K., Stewart, M., Massaquoi, S., Lou, J., & Hallett, M. (1993). Procedural learning in Parkinson's disease and cerebellar degeneration. *Annals of Neurology*, *34*, 594-602.
- Peigneux, P., Maquet, P., Meulemans, T., Destrebecqz, A., Laureys, S., Degueldre, C., . . . Cleeremans, A. (2000). Striatum forever, despite sequence learning variability: a random effect analysis of PET data. *Human Brain Mapping*, *10*, 179-194.
- Penhune, V. B., & Steele, C. J. (2012). Parallel contributions of cerebellar, striatal and M1 mechanisms to motor sequence learning. *Behavioural Brain Research*, *226*, 579-591.
- Perruchet, P., & Nicolas, S. (1998). L'apprentissage implicite: un débat théorique. *Psychologie française*, *43*, 13-26.
- Perruchet, P., & Vinter, A. (1998). Learning and development: The implicit knowledge assumption reconsidered. In M. A. Stadler & P. A. Frensch (Eds.), *Handbook of implicit learning* (pp. 495-531). Thousand Oaks, CA: Sage Publications.
- Piek, J. P., & Coleman-Carman, R. (1995). Kinaesthetic sensitivity and motor performance of children with developmental co-ordination disorder. *Developmental Medicine and Child Neurology*, *37*, 976-984.
- Piek, J. P., & Dyck, M. J. (2004). Sensory-motor deficits in children with developmental coordination disorder, attention deficit hyperactivity disorder and autistic disorder. *Human Movement Science*, *23*, 475-488.

- Piek, J. P., Dyck, M. J., Nieman, A., Anderson, M., Hay, D., Smith, L. M., . . . Hallmayer, J. (2004). The relationship between motor coordination, executive functioning and attention in school aged children. *Archives of Clinical Neuropsychology, 19*, 1063-1076.
- Polatajko, H. J., Fox, A. M., & Missiuna, C. (1995). An international consensus on children with developmental coordination disorder. *Canadian Journal of Occupational Therapy, 62*, 3-6.
- Prehn-Kristensen, A., Goder, R., Chirobeja, S., Bressmann, I., Ferstl, R., & Baving, L. (2009). Sleep in children enhances preferentially emotional declarative but not procedural memories. *Journal of Experimental Child Psychology, 104*, 132-139.
- Prevor, M. B., & Diamond, A. (2005). Color-object interference in young children: A Stroop effect in children 3½–6½ years old. *Cognitive Development, 20*, 256-278.
- Querne, L., Berquin, P., Vernier-Hauvette, M. P., Fall, S., Deltour, L., Meyer, M. E., & de Marco, G. (2008). Dysfunction of the attentional brain network in children with Developmental Coordination Disorder: A fMRI study. *Brain Research, 1244*, 89-102.
- Quintero-Gallego, E. A., Gomez, C. M., Casares, E. V., Marquez, J., & Perez-Santamaria, F. J. (2006). Declarative and procedural learning in children and adolescents with posterior fossa tumours. *Behavioral and Brain Functions, 2*, 9.
- Raberger, T., & Wimmer, H. (2003). On the automaticity/cerebellar deficit hypothesis of dyslexia: balancing and continuous rapid naming in dyslexic and ADHD children. *Neuropsychologia, 41*, 1493-1497.
- Rae, C., Lee, M. A., Dixon, R. M., Blamire, A. M., Thompson, C. H., Styles, P., . . . Stein, J. F. (1998). Metabolic abnormalities in developmental dyslexia detected by 1H magnetic resonance spectroscopy. *Lancet, 351*, 1849-1852.
- Ramus, F., Pidgeon, E., & Frith, U. (2003). The relationship between motor control and phonology in dyslexic children. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, 44*, 712-722.
- Raven, J. C. (1960). *Guide to the standard progressive matrices*. London, UK: HK Lewis.
- Raven, J. C., Court, J. H., & Raven, J. (1998). *Progressive colour matrices*. Oxford: Oxford: Psychologists Press.
- Reber, A. S. (1967). Implicit learning of artificial grammars. *Journal of verbal learning and verbal behavior, 6*, 855-863.
- Reber, A. S. (1993). *Implicit learning and tacit knowledge: An essay on the cognitive unconscious*. New York, NY: Oxford University Press.

- Reber, P. J. (2013). The neural basis of implicit learning and memory: A review of neuropsychological and neuroimaging research. *Neuropsychologia*, *51*, 2026-2042.
- Reed, J., & Johnson, P. (1994). Assessing implicit learning with indirect tests: Determining what is learned about sequence structure. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *20*, 585-594.
- Revie, G., & Larkin, D. (1993). Task-specific intervention with children reduces movement problems: a systems view. *Adapted Physical Activity Quarterly*, *10*, 29-41.
- Richer, F., Chouinard, M. J., & Rouleau, I. (1999). Frontal lesions impair the attentional control of movements during motor learning. *Neuropsychologia*, *37*, 1427-1435.
- Rohrer, D., & Pashler, H. E. (2003). Concurrent task effects on memory retrieval. *Psychonomic Bulletin & Review*, *10*, 96-103.
- Rosenblum, S., & Regev, N. (2013). Timing abilities among children with developmental coordination disorders (DCD) in comparison to children with typical development. *Research in Developmental Disabilities*, *34*, 218-227.
- Rouleau, I., Décary, A., Chicoine, A.-J., & Montplaisir, J. (2002). Procedural skill learning in obstructive sleep apnea syndrome. *Sleep*, *25*, 401-411.
- Rouleau, I., Salmon, D. P., & Vrbancic, M. (2002). Learning, retention and generalization of a mirror tracing skill in Alzheimer's disease. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *24*, 239-250.
- Rovee-Collier, C. (1997). Dissociations in infant memory: Rethinking the development of implicit and explicit memory. *Psychological Review*, *104*, 467-498.
- Rovee-Collier, C. (1999). The development of infant memory. *Current Directions in Psychological Science*, *8*, 80-85.
- Rovee-Collier, C., & Cuevas, K. (2009). Multiple memory systems are unnecessary to account for infant memory development: An ecological model. *Developmental Psychology*, *45*, 160-174.
- Rovee-Collier, C., & Giles, A. (2010). Why a neuromaturational model of memory fails: Exuberant learning in early infancy. *Behavioural Processes*, *83*, 197-206.
- Russeler, J., Gerth, I., & Munte, T. F. (2006). Implicit learning is intact in adult developmental dyslexic readers: Evidence from the serial reaction time task and artificial grammar learning. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *28*, 808-827.
- Sanchez, D. J., Gobel, E. W., & Reber, P. J. (2010). Performing the unexplainable: Implicit task performance reveals individually reliable sequence learning without explicit knowledge. *Psychonomic Bulletin & Review*, *17*, 790-796.

- Sanchez, D. J., & Reber, P. J. (2013). Explicit pre-training instruction does not improve implicit perceptual-motor sequence learning. *Cognition*, *126*, 341-351.
- Savelsbergh, G. J., Whiting, H. T., Pijpers, J. R., & van Santvoord, A. A. (1993). The visual guidance of catching. *Experimental Brain Research*, *93*, 148-156.
- Schacter, D. L., & Moscovitch, M. (1984). Infants, amnesics, and dissociable memory systems. In M. Moscovitch (Ed.), *Infant memory* (pp. 173-216). New York, NY: Plenum.
- Schendan, H. E., Searl, M. M., Melrose, R. J., & Stern, C. E. (2003). An fMRI study of the role of the medial temporal lobe in implicit and explicit sequence learning. *Neuron*, *37*, 1013-1025.
- Schleepen, T. M., & Jonkman, L. M. (2010). The development of non-spatial working memory capacity during childhood and adolescence and the role of interference control: an N-Back task study. *Developmental Neuropsychology*, *35*, 37-56.
- Schmidtke, K., Handschu, R., & Vollmer, H. (1996). Cognitive procedural learning in amnesia. *Brain and Cognition*, *32*, 441-467.
- Schmidtke, K., Manner, H., Kaufmann, R., & Schmolck, H. (2002). Cognitive procedural learning in patients with fronto-striatal lesions. *Learning and Memory*, *9*, 419-429.
- Schoemaker, M. M., van der Wees, M., Flapper, B., Verheij-Jansen, N., Scholten-Jaegers, S., & Geuze, R. H. (2001). Perceptual skills of children with developmental coordination disorder. *Human Movement Science*, *20*, 111-133.
- Schouten, A., Oostrom, K., Peters, A., Verloop, D., & Jennekens-Schinkel, A. (2000). Set-shifting in healthy children and in children with idiopathic or cryptogenic epilepsy. *Developmental Medicine and Child Neurology*, *42*, 392-397.
- Schumacher, E. H., & Schwarb, H. (2009). Parallel response selection disrupts sequence learning under dual-task conditions. *Journal of Experimental Psychology: General*, *138*, 270-290.
- Schvaneveldt, R. W., & Gomez, R. L. (1998). Attention and probabilistic sequence learning. *Psychological Research*, *61*, 175-190.
- Seeger, C. A. (1994). Implicit learning. *Psychological Bulletin*, *115*, 163-196.
- Seidler, R. D. (2007). Aging affects motor learning but not savings at transfer of learning. *Learning and Memory*, *14*, 17-21.
- Shadmehr, R., & Holcomb, H. H. (1999). Inhibitory control of competing motor memories. *Experimental Brain Research*, *126*, 235-251.

- Shanks, D. R. (2003). Attention and awareness in "implicit" sequence learning. *Advances in Consciousness Research*, 48, 11-42.
- Shanks, D. R., & Channon, S. (2002). Effects of a secondary task on "implicit" sequence learning: Learning or performance? *Psychological Research*, 66, 99-109.
- Sigmundsson, H., Hansen, P., & Talcott, J. (2003). Do 'clumsy' children have visual deficits. *Behavioural Brain Research*, 139, 123-129.
- Sigmundsson, H., Ingvaldsen, R. P., & Whiting, H. T. (1997). Inter- and intrasensory modality matching in children with hand-eye coordination problems: exploring the developmental lag hypothesis. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 39, 790-796.
- Sigmundsson, H., & Whiting, H. T. (2002). Hand preference in children with developmental coordination disorders: cause and effect? *Brain and Cognition*, 49, 45-53.
- Smidts, D. P., Jacobs, R., & Anderson, V. (2004). The Object Classification Task for Children (OCTC): a measure of concept generation and mental flexibility in early childhood. *Dev Neuropsychol*, 26, 385-401.
- Smits-Engelsman, B., Westenberg, Y., & Duysens, J. (2008). Children with developmental coordination disorder are equally able to generate force but show more variability than typically developing children. *Human Movement Science*, 27, 296-309.
- Smits-Engelsman, B., Wilson, P. H., Westenberg, Y., & Duysens, J. (2003). Fine motor deficiencies in children with developmental coordination disorder and learning disabilities: An underlying open-loop control deficit. *Human Movement Science*, 22, 495-513.
- Somsen, R. J. (2007). The development of attention regulation in the Wisconsin Card Sorting Task. *Developmental Science*, 10, 664-680.
- Song, S., Marks, B., Howard, J. H., & Howard, D. V. (2009). Evidence for parallel explicit and implicit sequence learning systems in older adults. *Behavioural Brain Research*, 196, 328-332.
- Soppelsa, R., & Albaret, J.-M. (2004). *Manuel de la Batterie d'Evaluation du Mouvement chez l'Enfant - M-ABC*. Paris: Editions du Centre de Psychologie Appliquée.
- Squire, L. R. (2004). Memory systems of the brain: A brief history and current perspective. *Neurobiology of Learning and Memory*, 82, 171-177.
- Stadler, M. A. (1992). Statistical structure and implicit serial learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 18, 318-327.
- Stadler, M. A., & Neely, C. B. (1997). Effects of sequence length and structure on implicit serial learning. *Psychological Research*, 60, 14-23.

- Stefaniak, N., Willems, S., Adam, S., & Meulemans, T. (2008). What is the impact of the explicit knowledge of sequence regularities on both deterministic and probabilistic serial reaction time task performance? *Memory and Cognition*, *36*, 1283-1298.
- Sun, R., Merrill, E., & Peterson, T. (2001). From implicit skills to explicit knowledge: A bottom-up model of skill learning. *Cognitive science*, *25*, 203-244.
- Sun, R., Slusarz, P., & Terry, C. (2005). The interaction of the explicit and the implicit in skill learning: A dual-process approach. *Psychological Review*, *112*, 159-192.
- Tahej, P. K., Ferrel-Chapus, C., Olivier, I., Ginjac, D., & Rolland, J. P. (2012). Multiple representations and mechanisms for visuomotor adaptation in young children. *Human Movement Science*, *31*, 1425-1435.
- Thomas, K. M., Hunt, R. H., Vizueta, N., Sommer, T., Durston, S., Yang, Y., & Worden, M. S. (2004). Evidence of developmental differences in implicit sequence learning: an fMRI study of children and adults. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *16*, 1339-1351.
- Thomas, K. M., & Nelson, C. A. (2001). Serial reaction time learning in preschool- and school-age children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *79*, 364-387.
- Tillman, C. M., Thorell, L. B., Brocki, K. C., & Bohlin, G. (2008). Motor response inhibition and execution in the stop-signal task: development and relation to ADHD behaviors. *Child Neuropsychology*, *14*, 42-59.
- Tombu, M., & Jolicoeur, P. (2003). A central capacity sharing model of dual-task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *29*, 3-18.
- Tsai, C. L., Pan, C. Y., Cheng, R. J., & Wu, S. K. (2009). Dual-task study of cognitive and postural interference: a preliminary investigation of the automatization deficit hypothesis of developmental co-ordination disorder. *Child: Care, Health and Development*, *35*, 551-560.
- Ullman, M. T., & Pierpont, E. I. (2005). Specific language impairment is not specific to language: The procedural deficit hypothesis. *Cortex*, *41*, 399-433.
- Vaivre-Douret, L. (2002). A more robust predictor of ideomotor dyspraxia: Study on an alternative scoring method of the Bergès-Lézine's Imitation of Gestures test. *Archives of Clinical Neuropsychology*, *17*, 37-48.
- Vaivre-Douret, L., Lalanne, C., Ingster-Moati, I., Boddaert, N., Cabrol, D., Dufier, J. L., . . . Falissard, B. (2011). Subtypes of developmental coordination disorder: research on their nature and etiology. *Dev Neuropsychol*, *36*, 614-643.
- Van der Linden, M. (2009). Troubles de la rétention à long terme. In M. Poncelet, S. Majerus & M. Van der Linden (Eds.), *Traité de neuropsychologie de l'enfant* (pp. 245-300). Marseille, France: Solal.

- Van Waelvelde, H., De Weerd, W., De Cock, P., & Smits-Engelsman, B. (2004). Association between visual perceptual deficits and motor deficits in children with developmental coordination disorder. *Developmental Medicine and Child Neurology*, *46*, 661-666.
- Vicari, S., Bellucci, S., & Carlesimo, G. A. (2001). Procedural learning deficit in children with Williams syndrome. *Neuropsychologia*, *39*, 665-677.
- Vicari, S., Finzi, A., Menghini, D., Marotta, L., Baldi, S., & Petrosini, L. (2005). Do children with developmental dyslexia have an implicit learning deficit? *Journal of Neurology of Neurosurgery and Psychiatry*, *76*, 1392-1397.
- Vicari, S., Marotta, L., Menghini, D., Molinari, M., & Petrosini, L. (2003). Implicit learning deficit in children with developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, *41*, 108-114.
- Vicari, S., Verucci, L., & Carlesimo, G. A. (2007). Implicit memory is independent from IQ and age but not from etiology: evidence from Down and Williams syndromes. *Journal of intellectual disability research JIDR*, *51*, 932-941.
- Vinter, A., & Perruchet, P. (1994). Is there an implicit level of representation? *Behavioral and Brain Sciences*, *17*, 730-731.
- Visser, J. (2003). Developmental coordination disorder: A review of research on subtypes and comorbidities. *Human Movement Science*, *22*, 479-493.
- Visser, J. (2007). Subtypes & comorbidities. In R. H. Geuze (Ed.), *Developmental coordination disorder: A review of current approaches* (pp. 87-116). Marseille, France: solal.
- Waber, D. P., De Moor, C., Forbes, P. W., Almli, C. R., Botteron, K. N., Leonard, G., . . . Brain Development Cooperative, G. (2007). The NIH MRI study of normal brain development: performance of a population based sample of healthy children aged 6 to 18 years on a neuropsychological battery. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *13*, 729-746.
- Ward, H., Shum, D., Wallace, G., & Boon, J. (2002). Pediatric traumatic brain injury and procedural memory. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *24*, 458-470.
- Wechsler, D. (2000). *WAIS-III: Echelle d'Intelligence de Wechsler pour adultes*. London, UK: The Psychological Corporation.
- Wechsler, D. (2005). *WISC-IV: Echelle d'Intelligence de Wechsler pour enfants*. London, UK: The Psychological Corporation.
- Welsh, M. C., Pennington, B. F., & Groisser, D. B. (1991). A normative-developmental study of executive function: A window of prefrontal function in children. *Developmental Neuropsychology*, *7*, 131-149.

- Wentworth, N., & Haith, M. M. (1992). Event-specific expectations of 2-and 3-month-old infants. *Developmental Psychology, 28*, 842-850.
- Willingham, D. B. (1998). A neuropsychological theory of motor skill learning. *Psychological Review, 105*, 558-584.
- Willingham, D. B., & Goedert-Eschmann, K. (1999). The relation between implicit and explicit learning: Evidence for parallel development. *Psychological Science, 10*, 531-534.
- Willingham, D. B., Koroshetz, W. J., & Peterson, E. W. (1996). Motor skills have diverse neural bases: Spared and impaired skill acquisition in Huntington's disease. *Neuropsychology, 10*, 315-321.
- Willingham, D. B., Nissen, M. J., & Bullemer, P. (1989). On the development of procedural knowledge. *Journal of experimental psychology Learning, memory, and cognition, 15*, 1047-1060.
- Wilson, P. H., & Butson, M. (2005). Déficits sous-jacents au trouble de l'acquisition de la coordination. In R. H. Geuze (Ed.), *Le trouble de l'acquisition de la coordination: Evaluation et rééducation de la maladresse chez l'enfant*. (pp. 117-146). Marseille, France: Solal.
- Wilson, P. H., & Maruff, P. (1999). Deficits in the control endogenous of covert visuospatial attention in children with developmental coordination disorder. *Human Movement Science, 18*, 421-442.
- Wilson, P. H., Maruff, P., & Lum, J. (2003). Procedural learning in children with developmental coordination disorder. *Human Movement Science, 22*, 515-526.
- Wilson, P. H., & McKenzie, B. E. (1998). Information processing deficits associated with Developmental Coordination disorder: A meta-analysis of research findings. *Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines, 39*, 829-840.
- Zar, J. (1999). *Biostatistical analysis: 4th edition*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.
- Zeffiro, T., & Eden, G. (2001). The cerebellum and dyslexia: perpetrator or innocent bystander?: Comment from Thomas Zeffiro and Guinevere Eden to Nicolson et al. *Trends in Neurosciences, 24*, 512-513.
- Zesiger, P. (2009). Les troubles de l'attention et des fonctions exécutives. In M. Poncelet & S. Majerus (Eds.), *Traité de neuropsychologie de l'enfant* (pp. 331-358). Marseille, France: Solal.
- Zimmerman, P., & Fimm, B. (1994). *Test for Attention Performance (TAP 1.02)*. Würselen, Germany: Psytest.
- Zimmerman, P., & Fimm, B. (2009). *Test d'évaluation de l'attention (TAP 2.2)*. Herzogenrath, Germany: PsyTest.

- Zoia, S., Barnett, A., Wilson, P. H., & Hill, E. (2006). Editorial: Developmental Coordination Disorder: Current issues. *Child: Care, Health and Development*, 32, 613-618.
- Zwicker, J. G., Missiuna, C., Harris, S. R., & Boyd, L. A. (2010). Brain activation of children with developmental coordination disorder is different than peers. *Pediatrics*, 126, 678-686.
- Zwicker, J. G., Missiuna, C., Harris, S. R., & Boyd, L. A. (2011). Brain activation associated with motor skill practice in children with developmental coordination disorder: an fMRI study. *International Journal of Developmental Neuroscience*, 29, 145-152.
- Zwicker, J. G., Missiuna, C., Harris, S. R., & Boyd, L. A. (2012). Developmental coordination disorder: A review and update. *European Journal of Paediatric Neurology*, 16, 573-581.
- Zwicker, J. G., Yoon, S. W., MacKay, M., Petrie-Thomas, J., Rogers, M., & Synnes, A. R. (2013). Perinatal and neonatal predictors of developmental coordination disorder in very low birthweight children. *Archives of Disease in Childhood*, 98, 118-122.