

Evaluation de la sensibilité d'un test d'apprentissage procédural perceptivo-moteur:

Etude de faisabilité et implications pour la pratique en psychomotricité



Mémoire en vue de l'obtention du Diplôme d'Etat de Psychomotricienne

Eloïse VUILLEMIN

Mémoire encadré par Elodie MARTIN et Jessica TALLET

Juin 2021

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	5
CADRE THÉORIQUE	
APPRENTISSAGE PROCÉDURAL PERCEPTIVO-MOTEUR.....	6
1. Apprentissage et mémoire.....	6
1.1. Le fonctionnement mnésique.....	6
1.1.1. Le processus de mémorisation.....	6
1.1.2. Trois modèles explicatifs.....	8
1.1.2.1. Modèle structuraliste (Squire, 1994).....	8
1.1.2.2. Modèle ACT (Anderson, 1987).....	9
1.1.2.3. Modèle MNESIS (Tulving, 1995 ; Eustache et Desgranges ; 2008).....	10
1.2. L'apprentissage moteur.....	11
1.2.1. Implicite ou explicite.....	11
1.2.2. Mesurer l'apprentissage : la performance.....	12
2. La notion d'apprentissage procédural.....	13
2.1. Différence avec l'apprentissage déclaratif.....	13
2.2. Différents types d'apprentissages procéduraux.....	14
3. Apprentissage procédural perceptivo-moteur (APPM).....	14
3.1. Modèle de Doyon.....	14
3.1.1. Phases d'apprentissage.....	14
3.1.2. Apprentissage de tâches perceptivo-motrices.....	15
3.1.2.1. Protocole de saut de cibles.....	16
3.1.2.2. Protocole de SRTT.....	17
3.1.3. Corrélats cérébraux spécifiques.....	18
3.2. Apprentissage procédural typique durant le développement.....	19
PERTURBATION DE L'APPM AU COURS DU DÉVELOPPEMENT.....	21
1. Théorie du déficit d'apprentissage procédural dans les troubles neurodéveloppementaux	21
1.1. Les troubles neurodéveloppementaux.....	21
1.2. Modèle de Nicolson et Fawcett 2007.....	22
2. Perturbations de l'APPM dans les TND chez l'enfant.....	23
2.1. TND présentant de possibles déficits d'APPM.....	23
2.1.1. Dyslexie.....	23
2.1.2. Trouble Spécifique du Langage.....	24
2.1.3. Trouble Développementale de la Coordination.....	24
2.2. TND où l'APPM semble préservé.....	25
2.2.1. Syndrome de Gilles de la Tourette.....	25
2.2.2. Trouble Déficitaire de l'Attention avec ou sans Hyperactivité.....	26
2.2.3. Trouble du Spectre de l'Autisme.....	27

3. Altérations de l'APPM à l'âge adulte et au cours du vieillissement.....	28
3.1. Déficit d'APPM à l'âge adulte.....	28
3.1.1. Persistance des TND.....	28
3.1.2. Pathologies psychiatriques.....	29
3.1.3. Pathologies neurologiques.....	30
3.2. Vieillesse et pathologies neurodégénératives.....	31
3.2.1. Maladie d'Alzheimer.....	31
3.2.2. Maladie de Parkinson.....	32
3.2.3. Autres pathologies dégénératives.....	33
METHODE	
PARTICIPANTS.....	36
MATÉRIELS.....	37
PROCÉDURES ET TÂCHES.....	37
1. Tâches expérimentales.....	37
1.1. Tâche d'apprentissage de séquences.....	39
1.2. Tâche d'adaptation perceptivo-motrice.....	40
2. Outils d'évaluation du niveau moteur.....	41
2.1. Évaluation des capacités graphiques.....	41
2.2. Questionnaire d'évaluation du niveau moteur perçu.....	41
2.3. Items sélectionnés au sein du MABC 2.....	42
RÉSULTATS.....	42
1. Tâches expérimentales.....	43
1.1. Apprentissage de séquence.....	43
1.2. Adaptation visuomotrice.....	44
2. Évaluation des habiletés motrices.....	45
2.1. Latéralité et évaluation des capacités graphiques.....	45
2.2. Questionnaire d'évaluation du niveau moteur perçu.....	45
2.3. Épreuves du MABC 2.....	46
DISCUSSION.....	47
Adaptations des tâches expérimentales.....	47
Évaluation du niveau moteur.....	49
Parallèle entre les tâches expérimentales et le niveau moteur.....	49
CONCLUSION.....	50
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	51
ANNEXES.....	60
RÉSUMÉ.....	65

FIGURES

Figure 1 : Modèle linéaire d'Atkinson et Shiffrin (1968)	7
Figure 2 : Subdivision de la mémoire à long terme et structures cérébrales impliquées.....	8
Figure 3 : Architecture générale du modèle ACT.....	9
Figure 4 : Modèle MNESIS.....	10
Figure 5 : Courbe d'apprentissage.....	12
Figure 6 : Illustration d'une tâche de SRTT.....	15
Figure 7 : Evolution de la performance au cours d'une tâche de SRTT.....	17
Figure 8 : Modèle de plasticité cérébrale relié à l'apprentissage d'habiletés motrices.....	18
Figure 9 : Structures neurologiques impliquées dans l'apprentissage procédural.....	19
Figure 10 : Représentation schématique des modèles de développement de l'apprentissage procédural.....	20
Figure 11 : Classification des troubles neurodéveloppementaux.....	21
Figure 12 : Modèle explicatif des troubles neurodéveloppementaux en fonction du niveau des capacités d'apprentissage déclaratif et procédural.....	22
Figure 13 : Interface graphique des tâches expérimentales.....	37
Figure 14 : Courbe d'évolution du temps de réaction attendue pour les tâches expérimentales.....	38
Figure 15 : Présentation de la tâche de SRTT.....	39
Figure 16 : Présentation de la tâche de sauts de cible.....	40
Figures 17, 18, 19 : Résultats des pilotes sur la tâche de SRTT.....	43
Figures 20, 21, 22 : Résultats des pilotes sur la tâche de sauts de cible.....	44
Figure 23 : Scores au questionnaire d'évaluation du niveau moteur perçu.....	45
Figure 24 : Scores aux épreuves du MABC 2.....	46

INTRODUCTION

Dans la vie quotidienne de nombreuses habiletés motrices comme la conduite, la pratique du vélo, le laçage des chaussures, l'écriture, l'habillage, etc. nécessitent un apprentissage procédural perceptivo-moteur (APPM). On sait grâce à la littérature que l'APPM est altéré dans un certain nombre de pathologies et notamment dans les pathologies neurodégénératives (Doyon et Benali, 2005 ; Martin*, Scotto-Baranoff & Tallet, in prep) et les troubles du neurodéveloppement (Nicolson et Fawcett, 2007 ; Blais et al., 2018 ; Lê et al., 2020). Or, il n'existe pas d'outil clinique permettant de mesurer les processus d'APPM des patients avant de commencer la rééducation. Pourtant l'apprentissage procédural est un pré-requis à la rééducation notamment en psychomotricité où il s'agit de permettre au patient d'apprendre ou de réapprendre des habiletés motrices pour être autonome et s'adapter aux situations du quotidien. Les psychomotriciens disposent d'un large panel de tests et questionnaires standardisés pour évaluer les habiletés motrices (Annexe 1). Cependant, rien ne permet encore d'évaluer l'APPM pourtant fondamental au développement des habiletés motrices. Il existe alors un réel intérêt à construire un outil d'évaluation des processus d'APPM.

Dans la recherche, beaucoup d'études utilisent des tâches de laboratoire pour mesurer deux grands types d'APPM : l'apprentissage de séquences motrices et l'adaptation perceptivo-motrice (Doyon et Benali, 2005). Ces tâches ont pour qualité d'avoir été testées dans de nombreuses conditions et auprès de diverses populations, elles ne requièrent que peu de matériel, permettent une mesure précise des processus d'apprentissage et requièrent que peu de compétences cognitives et/ou motrices. S'inspirer de telles tâches permettrait alors de construire un test d'évaluation de l'apprentissage procédural perceptivo-moteur. Pouvoir quantifier une atteinte d'un des deux types d'APPM chez un patient permettrait ainsi aux psychomotriciens d'adapter leur prise en charge en vue de réduire ou compenser le trouble perceptivo-moteur.

Au sein de ce mémoire, nous tâcherons de mettre en avant l'intérêt en psychomotricité de développer un outil permettant d'évaluer les processus d'APPM afin de proposer des interventions adaptées à chaque patient en ajustant les paramètres d'apprentissage en fonction des difficultés de chacun. Une première partie va servir à poser le cadre théorique, il s'agira alors de décrire l'APPM, ses fondements théoriques et ses différentes phases chez des individus sains, mais également ses perturbations au cours du développement. Une seconde partie sera consacrée à l'étude de faisabilité menée pour élaborer l'outil permettant d'évaluer l'APPM. Nous développerons ainsi la méthode de notre étude avec les différents ajustements appliqués au fil des essais réalisés et des résultats obtenus ; le but étant de pouvoir étudier les corrélations possibles entre l'outil d'évaluation et les habiletés motrices.

CADRE THÉORIQUE

APPRENTISSAGE PROCÉDURAL PERCEPTIVO-MOTEUR

1. Apprentissage et mémoire

L'apprentissage se caractérise par l'acquisition de nouvelles informations, nous sommes capables d'apprendre sans cesse de nouveaux savoirs et savoir-faire. La trace laissée par ce processus d'apprentissage correspond à la mémoire. En effet, les nouvelles informations acquises sont encodées par le système nerveux afin d'être stockées et ré-utilisées à court ou long terme.

L'apprentissage et la mémoire sont donc deux processus distincts en constante association qui vont mobiliser plusieurs structures neurologiques spécifiques.

1.1. Le fonctionnement mnésique

1.1.1. Le processus de mémorisation

La mémoire est la fonction cognitive qui s'appuie sur l'interaction de trois mécanismes : l'encodage, le stockage et la restitution des informations. Ils vont se succéder et sont essentiels pour un traitement mnésique efficient.

- L'encodage : Il s'agit de l'entrée de l'information. Le sujet constitue une représentation mentale d'un stimulus sensoriel à partir d'une sélection d'indices. Cette étape peut être intentionnelle et nécessiter efforts et attention ou implicite c'est-à-dire sans en avoir conscience.
- Le stockage : C'est la conservation et la consolidation de l'information.
La représentation mentale va être stockée et consolidée durant un intervalle de rétention. La consolidation peut varier en fonction de la répétition et de l'impact émotionnel de l'information sur le sujet. La qualité du processus de consolidation va déterminer si l'information va être conservée à l'identique, modifiée, dégradée ou effacée.
- La récupération : Cette étape constitue le rappel et la restitution de l'information. Le sujet accède aux informations stockées en mémoire pour pouvoir les utiliser. Ce rappel peut se faire soit consciemment soit à l'insu du sujet. Il est en général plus simple de récupérer une information stockée grâce à une tâche de reconnaissance d'indices plutôt qu'un rappel libre. Ce sont les stratégies mises en place lors de l'encodage qui vont influencer les processus de récupération des informations en mémoire.

Il est difficile de trouver des consensus portant sur le fonctionnement mnésique et les différents types de mémoire. La notion d'une subdivision de la mémoire est apparue en 1890 avec William James. De nombreux modèles théoriques ont ensuite précisé cette organisation. Le modèle séquentiel de l'apprentissage d'Atkinson et Shiffrin (1968) décrit le cheminement d'une information entre sa perception et son stockage définitif. La mémoire peut ainsi être divisée en trois composantes principales en fonction de la durée de la trace mnésique : la mémoire sensorielle, la mémoire à court terme et la mémoire à long terme.

La mémoire sensorielle est une mémoire transitoire dont les traces sont éphémères : 300 à 500 millisecondes pour la mémoire sensorielle visuelle (mémoire iconique), 2 à 3 secondes pour la mémoire sensorielle auditive (mémoire échoïque). Les informations pertinentes sont dirigées vers la mémoire à court terme, ou mémoire de travail dont les principales caractéristiques sont sa courte durée (20 à 30 secondes), sa capacité limitée (empan mnésique : 7 ± 2 items ; Miller, 1956) et sa sensibilité aux interférences (Baddeley & Hitch, 1974). Grâce à elle, une courte série d'informations peut être maintenue temporairement pour les comprendre, les répéter, les manipuler et potentiellement les mémoriser en les encodant dans la mémoire à long terme. Il s'agit d'un vaste lieu de stockage contenant des informations pour une longue durée de rétention (quelques minutes à plusieurs années).

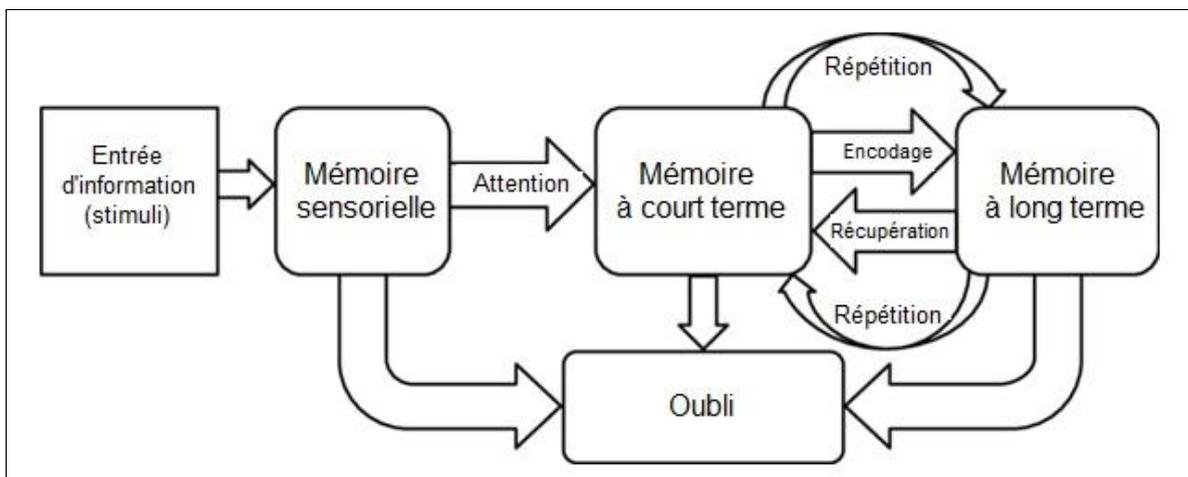


Figure 1 : Modèle linéaire d'Atkinson et Shiffrin (1968)

Plusieurs auteurs se sont intéressés à la subdivision de la mémoire, s'inspirant du modèle linéaire d'Atkinson et Shiffrin, notamment en proposant des distinctions au sein de la mémoire à long terme à partir des recherches de Tulving en 1972. Ainsi, plusieurs modèles explicatifs ont vu le jour pour décrire précisément le système mnésique.

1.1.2. Trois modèles explicatifs

1.1.2.1. Modèle structuraliste (Squire, 1994)

Ce modèle élaboré à partir de 1993 par Squire et ses collaborateurs décrit le fonctionnement mnésique en associant chaque subdivision de la mémoire à long terme à la structure cérébrale impliquée. La constitution de la taxonomie présentée sur la figure 2 a été permise grâce à des études impliquant des paradigmes de doubles dissociations fonctionnelles. En effet, ce type de paradigme permet de mettre en évidence une dissociation de deux structures fonctionnellement distinctes.

Pour obtenir une double dissociation, il faut d'une part, un patient atteint d'une lésion localisée capable de réaliser une tâche X tout en étant déficitaire sur une tâche Y et d'autre part, un second patient atteint d'une autre lésion localisée qui réussit la tâche Y mais pas la tâche X. Ainsi il est possible de conclure que le site de lésion des patients gère des fonctions distinctes. Squire et ses collaborateurs ont pu de cette manière distinguer les mémoires déclaratives (lobe temporal médian) et non déclaratives (ganglions de la base, cervelet) comme deux modules mnésiques fonctionnellement et anatomiquement distincts. Ils ont ensuite décrit les différents sous-systèmes mnésiques existants en fonction des zones cérébrales activées. Néanmoins, ce modèle structuraliste ne développe pas les interactions entre les différents systèmes ni leur fonctionnement respectif.

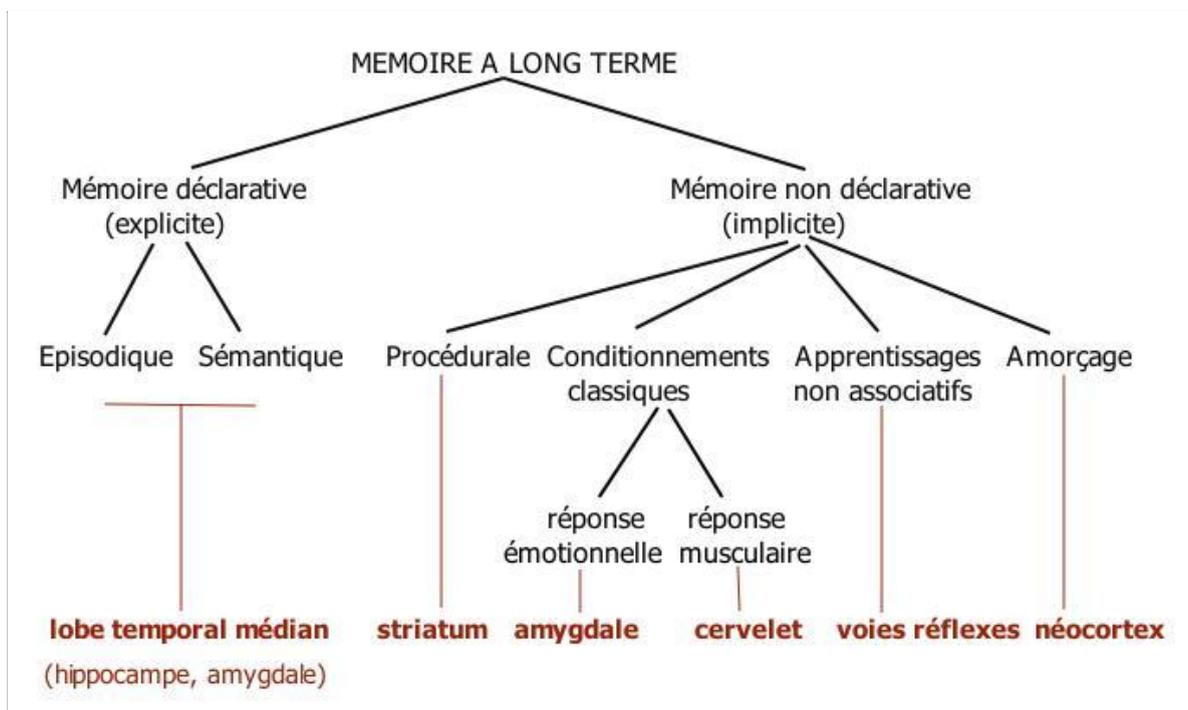


Figure 2 : Subdivision de la mémoire à long terme et structures cérébrales impliquées (Squire, 2004)

1.1.2.2. Modèle ACT (Anderson, 1987)

Le modèle "Adaptative Control of Thought" (ACT) a été proposé en 1987 par Anderson et stipule que les connaissances sont organisées en réseau et stockées sous forme de nœuds interconnectés. L'architecture du modèle présentée en figure 3 comporte trois systèmes :

- La *mémoire de travail* contient des représentations du monde actuel ou de la situation donnée afin d'élaborer des raisonnements et de prendre des décisions. Il s'agit d'un administrateur mettant en relation les registres déclaratifs et procéduraux de la mémoire à long terme.
- La *mémoire déclarative* correspond à un réseau de concepts interconnectés. L'information stockée n'est pas liée à une situation spécifique, elle est récupérable et peut être exprimée sous forme verbale.
- La *mémoire procédurale* correspond quant à elle à un stock de savoir-faire se présentant sous la forme de règles de production dont la description verbale n'est pas possible.

Le fonctionnement de ce modèle repose sur quatre mécanismes : Le stockage de nouvelles informations c'est-à-dire la création et la mémorisation de nouvelles représentations. La récupération d'informations en provenance de la mémoire déclarative. L'appariement permettant de comparer le contenu de la mémoire de travail avec les prémices des règles de production stockées en mémoire procédurale. Et l'exécution qui correspond au transfert de connaissances entre la mémoire de travail et la mémoire à long terme, conduisant ainsi à l'élaboration de nouvelles règles de production dans le but de produire une performance.

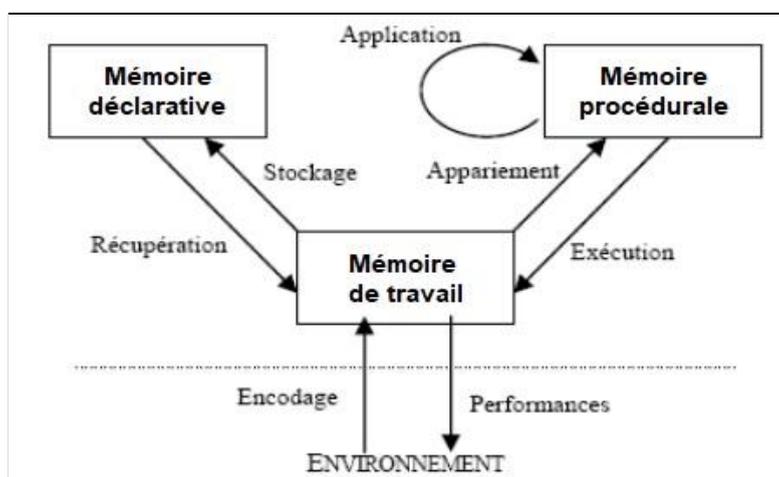


Figure 3 : Architecture générale du modèle ACT (Anderson, 2013)

Ainsi, la conception d'Anderson permet d'analyser fonctionnellement les activités mentales de résolutions de problèmes, en fonction de l'évolution des connaissances et de leur utilisation par la mémoire de travail. L'intérêt de ce modèle concerne le fonctionnement de la mémoire dans les activités du quotidien sans préciser pour autant comment fonctionnent les mémoires déclaratives et procédurales sur le long terme.

1.1.2.3. Modèle MNESIS (Tulving, 1995 ; Eustache et Desgranges ; 2008)

En 2008, Eustache et Desgranges créent le modèle MNESIS (Memory NEo Structural Inter-Systemic model) (Figure 3) qui reprend les 5 systèmes mnésiques du modèle de Tulving (1995) tout en réunissant les données actuelles de la mémoire en neuropsychologie cognitive. Ce modèle se base sur la conception de systèmes multiples de la mémoire et tente de spécifier les différentes relations qu'ils entretiennent entre eux.

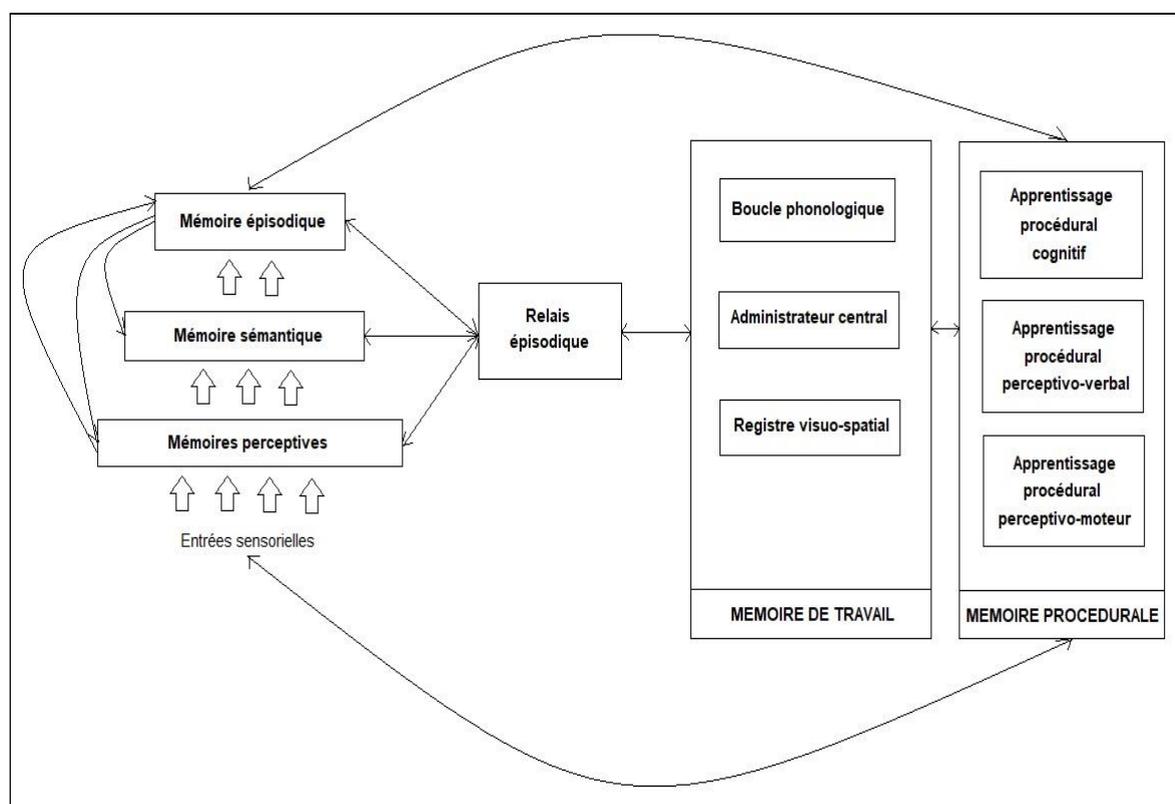


Figure 4 : Modèle MNESIS (Eustache, F. & Desgranges, B. 2008)

- Dans la partie gauche du schéma sont symbolisées les représentations à long terme de la mémoire : perceptive, sémantique et épisodique. Elles respectent une organisation hiérarchique avec un système de rétroaction.
- Dans la partie centrale du schéma, on trouve la mémoire de travail qui permet le maintien temporaire de l'information telle qu'elle a été décrite par Baddeley (1992) avec l'administrateur central, la boucle phonologique et le calepin visuo-spatial. Le relais épisodique joue un rôle essentiel puisqu'il fait le lien entre la mémoire de travail et la mémoire à long terme.
- Enfin, la mémoire procédurale est représentée dans la partie droite du schéma. Il s'agit d'un système d'action à trois entrées : apprentissage procédural perceptivo-moteur, cognitif et perceptivo-verbal.

La mémoire n'est donc pas un système uniforme, mais plutôt une interaction entre plusieurs sous-systèmes. Il est donc essentiel de tenir compte des différentes relations entre les systèmes lorsqu'on s'intéresse à l'apprentissage et à la mémorisation.

1.2. L'apprentissage moteur

Schmidt (1975) définit l'apprentissage comme un processus qui aboutit à l'acquisition d'un savoir ou d'un savoir-faire suite à l'expérimentation du sujet.

Il précise plus tard que l'apprentissage moteur est "un ensemble d'opérations associées à la pratique ou à l'expérience, qui conduisent à des changements relativement permanents des compétences pour la performance des habiletés motrices" (Schmidt, 1993, p169). Il existe plusieurs façons d'apprendre, mais celles-ci ne vont pas avoir le même impact en termes de mémorisation.

1.2.1. Implicite ou explicite

Le terme d'apprentissage implicite recouvre toutes les formes d'apprentissage qui s'opèrent à l'insu du sujet, sans que ce dernier soit conscient du fait qu'il est en train de modifier de manière stable son comportement (Witt, 2010). L'apprenant n'a donc pas connaissance du but ou du moyen de parvenir au but de l'apprentissage. Cette forme d'apprentissage a été mise en évidence par Reber à partir de 1967 grâce à la grammaire artificielle de Miller¹. Elle nécessite un traitement dit « bottom-up » car l'apprenant est incité par des stimuli, c'est un traitement de bas niveau qui mobilise des mécanismes associatifs élémentaires. Il s'agit d'un apprentissage précoce, robuste dans le temps mais avec une certaine rigidité puisque l'adaptation à des situations un peu différentes nécessite souvent un nouvel apprentissage.

L'apprentissage explicite répond quant à lui à des instructions, des règles qui sont formulées à l'apprenant, celui-ci a conscience de la compétence à acquérir. Il s'agit d'un apprentissage qui implique des étapes cognitives dans le processus d'apprentissage et qui dépend de l'implication de la mémoire de travail (Kleynen & al., 2015). Le coût cognitif est donc important, il s'agit d'un traitement top-down car les consignes sont dirigées vers l'objet d'apprentissage. Les facteurs individuels sont à prendre en compte : âge, QI, habiletés verbales du sujet (Jongbloed-Pereboom & al., 2019). En effet, le sujet doit pouvoir sélectionner dans un ensemble de comportement celui qui est le plus pertinent, on parle d'apprentissage hypothético-déductif.

De manière générale, beaucoup d'apprentissages sont mixtes et combinent des procédés implicites et explicites de manière simultanée ou différée. Cela dépend de divers facteurs : le type de tâche apprise, les capacités de l'apprenant et le stade de l'apprentissage moteur (Kleynen & al. ; 2015).

¹ L'objectif du paradigme de grammaires artificielles est de démontrer le caractère non conscient de certains apprentissages. Le paradigme consiste à demander à des sujets de mémoriser des séries de lettres générées par une grammaire artificielle. Celle-ci consiste en l'élaboration de séquences qui suivent des règles logiques. Si l'on montre à ces personnes plusieurs séquences, certaines avec un lien logique, d'autres sans, la majeure partie de ces personnes vont être capables de savoir qu'il existe une règle sans vraiment la comprendre, en mettant de côté les séquences sans lien logique. Il semblerait donc que les sujets puissent apprendre une règle grammaticale de manière tout à fait implicite

1.2.2. Mesurer l'apprentissage : la performance

On ne peut pas observer l'apprentissage, on peut observer une performance, c'est-à-dire un changement de comportement. Le changement dans la performance est le seul moyen de savoir si un apprentissage a lieu. La performance se mesure lors de l'accomplissement d'une tâche, d'une action. Elle peut varier en fonction de plusieurs facteurs : la motivation, les capacités motrices et sensorielles, les opportunités d'expérimentation, la fatigue, l'état psychologique ... (Cahill, McGaugh & Weinberger, 2001). Lorsqu'on fait subir un apprentissage à quelqu'un, sa performance augmente (diminution du temps de réponse et du nombre d'erreurs) puis se stabilise progressivement. On peut ainsi tracer des courbes de performance au cours de l'apprentissage.

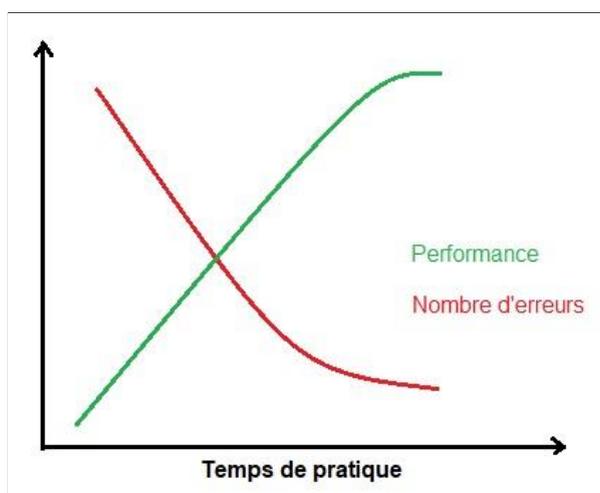


Figure 5 : Courbe d'apprentissage montrant une augmentation de la performance consécutive à la diminution du nombre d'erreurs au cours des entraînements.

La maturation permet également l'acquisition de performances qui ne sont pas forcément dues à l'apprentissage, on peut citer par exemple l'augmentation de la taille ou la disparition des réflexes archaïques. Cependant, il y a une interaction entre la maturation et l'apprentissage car certains apprentissages ne sont possibles que si le niveau de maturation est suffisant comme l'apprentissage de la propreté.

La mémoire et l'apprentissage sont ainsi deux processus en lien permanent. C'est pour cela qu'en psychomotricité, différentes formes d'apprentissage sont mises en jeu afin d'avoir une influence sur la trace mnésique des patients. Il est alors essentiel de prendre en compte les spécificités des patients en lien avec leur pathologie et leur fonctionnement interne pour adapter les interventions de prise en charge. Nous allons à présent nous focaliser sur l'apprentissage procédural en lien avec l'acquisition d'habiletés motrices.

2. La notion d'apprentissage procédural

2.1. Différence avec l'apprentissage déclaratif

Dès les années 60, Brenda Milner remarquait que son patient HM était incapable de stocker de nouvelles connaissances, mais pouvait apprendre de nouveaux mouvements et savoir-faire. Ainsi le test de dessin en miroir, administré à ce patient, montrait que s'il n'avait pas de connaissance explicite et verbalisable d'avoir appris, il améliorait sa dextérité au fur et à mesure des passations. Il était également capable d'apprendre des connaissances implicites mobilisées dans la résolution de problème de la tour de Hanoi (Milner et al., 1968).

C'est suite à ses observations que la distinction a été proposée par Cohen et Squire en 1980 entre mémoire déclarative et mémoire procédurale et permet de faire la différence entre les souvenirs de contenus (événements et connaissances) et les souvenirs d'habiletés ou procédures (opérations). Les savoirs et savoir-faire doivent donc être considérés différemment notamment en terme d'apprentissage. On distingue ainsi l'apprentissage déclaratif de l'apprentissage procédural.

L'apprentissage déclaratif se compose d'un versant sémantique qui concerne l'encodage de concepts, de savoirs permettant la production et la compréhension du langage, la lecture et l'écriture ainsi que l'identification d'objet. L'autre versant est épisodique c'est à dire qu'il relève de l'histoire de l'individu et concerne ainsi l'assimilation de souvenirs autobiographiques. Ce type d'apprentissage influe sur la mémoire déclarative, les connaissances qui en résultent sont explicites et accessibles à la conscience notamment par le langage ou par l'imagerie mentale (aspect non-verbal) (Squire, 1986).

L'apprentissage procédural est caractérisé par une acquisition progressive d'habiletés, non-accessibles à la conscience, et documenté par l'amélioration de la performance au fil de l'entraînement (Mayor Dubois, 2010). Les nouvelles habiletés vont être encodées au sein de la mémoire procédurale (Beaunieux & al., 2006) et les savoir-faire qui en résultent ne sont pas facilement verbalisables, car ils ne sont accessibles que par la réalisation de procédures (Squire, 1982). Ce n'est que lorsque la procédure apprise devient automatique (sans faire appel à l'attention soutenue) qu'elle appartient à la mémoire procédurale. À ce stade il devient difficile de décrire pas à pas la procédure et le simple fait de tenter de le faire peut impacter négativement la performance (Hirsh, 1974). L'apprentissage procédural s'avère efficace dans les tâches, qui se caractérisent par la présence d'une composante motrice, l'invariance des consignes et du matériel ainsi que des modalités d'encodage et de récupération fixe. Une fois automatisé, l'apprentissage procédural est intégré dans un comportement unifié ayant un seul déclencheur : le but à atteindre.

Un apprentissage procédural se déroule en 3 phases et implique de nombreux systèmes cognitifs. On retrouve alors la phase cognitive avec la découverte de l'habileté, la performance est ici aléatoire. Ensuite, la phase associative va permettre d'associer un pattern comportemental spécifique au résultat attendu ; la procédure se met en place pour une exécution plus précise et plus rapide. Enfin, la phase d'automatisation reflète la réalisation du comportement la plus efficiente et repose uniquement sur des connaissances procédurales (Fitts, 1964).

2.2. Différents types d'apprentissages procéduraux

Il existe trois types d'apprentissages procéduraux (Beaunieux & al., 1998) : l'apprentissage procédural cognitif, l'apprentissage procédural perceptivo-verbal et l'apprentissage procédural perceptivo-moteur. L'apprentissage cognitif est en lien avec le système déclaratif alors que les systèmes verbaux et moteurs seraient plus en lien avec la mémoire perceptive. Les apprentissages moteurs (faire du vélo, jouer du piano) élaborent la mémoire de l'action ou mémoire procédurale perceptivo-motrice. Les apprentissages verbaux (poèmes, tables de multiplication, règles de grammaire) constituent la mémoire de représentation ou mémoire perceptivo-verbale.

Au sein de notre étude, nous allons nous concentrer essentiellement sur les processus d'apprentissage procédural perceptivo-moteur.

3. Apprentissage procédural perceptivo-moteur (APPM)

3.1. Modèle de Doyon

Julien Doyon est un chercheur canadien ayant particulièrement étudié les réseaux neuronaux impliqués dans l'acquisition d'habiletés motrices. Il a mené pour cela des expériences en imagerie avec des sujets sains mais aussi avec des patients présentant diverses atteintes neurologiques. Suite à ses recherches, il propose en 2003 un modèle décrivant les activations cérébrales consécutives à l'apprentissage procédural perceptivo moteur ; il fait alors une distinction entre l'apprentissage de séquences motrices et l'adaptation perceptivo-motrice (Doyon et al., 2003).

Des études ultérieures menées par Doyon et ses collaborateurs vont permettre d'améliorer ce modèle (Doyon & Benali, 2005 ; Doyon et al., 2009, 2017).

3.1.1. Phases d'apprentissage

Les étapes de l'apprentissage procédural perceptivo-moteur sont présentées par Doyon (2003, 2005, 2009, 2013) et correspondent aux différentes phases de l'apprentissage procédural mais appliquées au type perceptivo-moteur (Figure 5).

La phase d'entraînement se caractérise par la répétition de la tâche cible, l'acquisition va donc se faire rapidement et se traduire par une nette amélioration de la performance. Ensuite, l'apprentissage se consolide c'est à dire que l'habileté motrice produit durant l'entraînement une représentation neurale (trace mnésique) et celle-ci va être transférée de manière différée en mémoire à long terme grâce à des modifications fonctionnelles (Doyon & al., 2011). La consolidation va dépendre de l'aspect de la tâche et de l'opportunité de dormir (Albouy & al, 2015). A la suite de la consolidation, la performance de l'apprenant va s'améliorer plus lentement en répétant la tâche jusqu'à atteindre une stabilisation progressive ; il s'agit de la phase d'acquisition lente. Enfin, lorsqu'il n'y a plus d'amélioration de performance, on considère que la tâche est totalement automatisée.

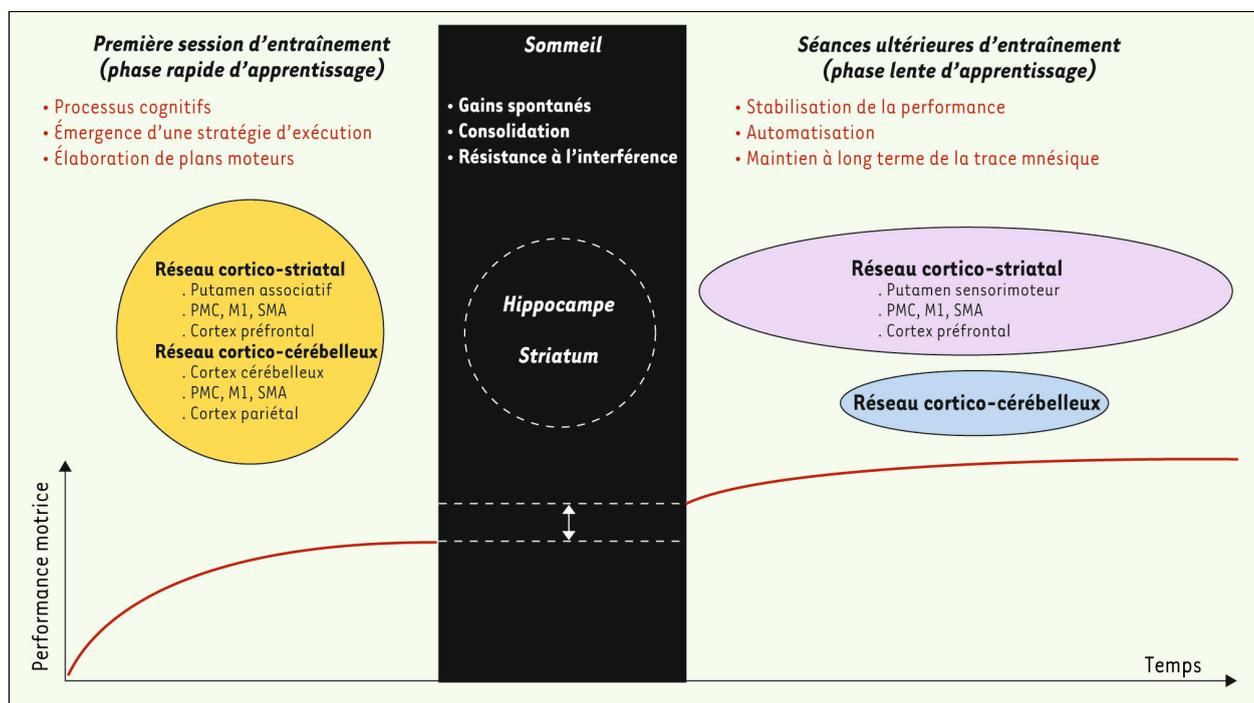


Figure 8 : Modèle de plasticité cérébrale lié à l'apprentissage d'habiletés motrices (Doyon & al., 2011)

3.1.2. Apprentissage de tâches perceptivo-motrices

Les tâches perceptivo-motrices s'appuient sur l'intégration de mouvements physiques en fonction d'informations sensorielles reçues. Ce sont des habiletés motrices dont l'objectif est non symbolique (sans signification) et qui sont spécifiques à un stimulus particulier (Rosenbaum & al., 2001). Deux types d'apprentissages perceptivo-moteurs existent : l'adaptation perceptivo-motrice et l'acquisition de séquences motrices (Doyon & al., 2009).

L'adaptation perceptivo-motrice est la modification d'un mouvement au cours des essais à partir d'informations perceptives. Les paradigmes d'adaptation motrice regroupent des tâches faisant appel à la pratique d'habiletés perceptivo-motrices dont la particularité est d'introduire un conflit entre les informations provenant du système visuel et celles provenant du système moteur.

Les principaux paradigmes expérimentaux sont :

- Tâche de poursuite rotative (Soliveri & al. 1997) : Le sujet est invité à suivre une cible en déplaçant la position d'un pointeur sur un écran. Le sujet contrôle la position de ce pointeur en déplaçant son bras. Il doit s'adapter au déplacement aléatoire de la cible.
- Tâche de tracé en miroir (Schérer & al., 2003) : Le sujet doit dessiner une étoile en suivant le modèle déjà tracé, mais le retour visuel se fait à travers un miroir.
- Tâche d'adaptation perceptivo-motrice avec lunettes prismatiques (Nemanich & al., 2015) : Le sujet porte des lunettes qui inversent l'orientation de la scène (le haut devient le bas), et doit guider quelqu'un dans l'environnement.

Dans chacune de ces tâches, il s'agit de mesurer la précision et la vitesse d'exécution.

L'acquisition de séquences motrices est la capacité de reproduire un ordre sériel de stimuli, le plus rapidement et précisément possible. Il existe deux grands paradigmes expérimentaux pour évaluer cette compétence : les tâches de FOT (Finger to thumb Opposition Task) et les tâches de SRTT (Serial Reaction Time Task).

- FOT (Canavan & al., 1989) : Le sujet doit répéter une séquence d'opposition de doigts : soit les doigts opposés avec le pouce, soit les doigts avec un clavier. Il s'agit d'un apprentissage explicite car le sujet sait d'avance que les séquences répétées sont identiques, cela nécessite la préservation des praxies idéomotrices digitales.
- SRTT (Nissen & Bullemer, 1987) : Le sujet appuie sur une des quatre touches qui lui sont présentées en fonction de l'emplacement des différents stimuli qui apparaissent sur l'écran. Le sujet ignore que les séquences sont identiques, cela nécessite ici la préservation des compétences visuo-spatiales.

Dans chacune de ces tâches, il s'agit de mesurer la vitesse de réalisation et le nombre d'erreurs.

Pour élaborer le test d'apprentissage procédural perceptivo-moteur, nous nous sommes intéressées aux différentes tâches perceptivo-motrices expérimentales afin de nous en inspirer dans le but de proposer des épreuves pertinentes qui puissent facilement s'intégrer au sein d'un bilan psychomoteur. Les protocoles décrits dans la suite de cette partie sont ceux qui ont été adaptés pour l'élaboration du test d'évaluation des processus d'APPM.

3.1.2.1. Protocole de saut de cibles

L'adaptation aux perturbations externes a été étudiée à travers l'application d'une transformation écran-curseur lors de mouvements de pointage notamment dans les tâches de poursuite rotative. En effet, cette forme de perturbation provoque un biais directionnel systématique permettant de sonder les processus adaptatifs (Krakauer 2009).

Quelques études (McLaughlin, 1967 ; Goodale, 1986 ; Desmurget, 1997-1999, Cameron 2011) ont quant à elles mis en place différents protocoles de saut de cible où la perturbation concerne le décalage de la cible à pointer. Il s'agit d'une adaptation perceptivo-motrice car cette épreuve nécessite un ajustement du mouvement en fonction de la rétroaction visuelle décalée. L'apprentissage de l'adaptation perceptivo-motrice sur cette tâche se caractérise par une réduction des erreurs, dans le sens où le sujet parvient progressivement à prédire le décalage de la cible généré par son mouvement et à adapter son geste en conséquence.

3.1.2.2. Protocole de SRTT

Classiquement la tâche de SRTT est présentée au sujet sans qu'il ne soit au courant de la situation d'apprentissage, pour lui, il s'agit seulement d'un test de temps de réaction. Il réalise alors la tâche en tentant de répondre aussi rapidement et précisément que possible.

La tâche se présente ainsi : des stimuli visuels apparaissent sur l'écran de l'ordinateur à 4 emplacements possibles ; chacun des 4 emplacements de ces stimuli correspond à des touches spécifiques du clavier. A chaque apparition d'un stimulus, le participant doit taper le plus vite possible sur la touche correspondante. Les stimuli n'apparaissent en fait pas de manière aléatoire mais selon une séquence prédéterminée. Par répétition le sujet apprend de manière implicite la séquence, il devient capable d'anticiper l'emplacement du stimulus suivant, cela est attesté par la diminution des temps de réaction au fil des essais et par la diminution du nombre de réponses incorrectes.

A la suite de plusieurs blocs d'essais, on propose au sujet un bloc d'essais contenant une séquence aléatoire. L'augmentation des temps de réaction et du nombre de réponses incorrectes lors de ce bloc met en évidence l'apprentissage spécifique de la séquence précédemment répétée.

Séquence : 1-2-1-4-2-3-4-1-3-2-4-1- ...

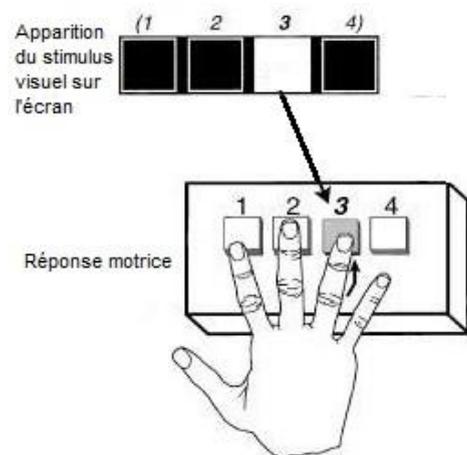


Figure 6 : Illustration d'une tâche de SRTT

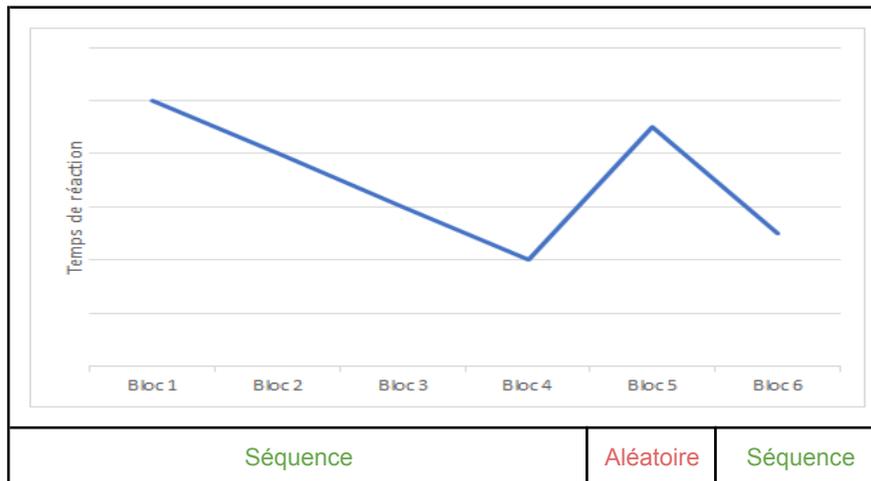


Figure 7 : Evolution de la performance au cours d'une tâche de SRTT

Les deux types d'APPM que nous venons de décrire sont donc deux processus différents s'appuyant sur des réseaux cérébraux distincts comme le décrit le modèle de l'APPM de Doyon (Doyon et al., 2003 ; Doyon & Benali, 2005 ; Doyon et al., 2009 ; Doyon et al., 2018).

3.1.3. Corrélats cérébraux spécifiques

La distinction entre les structures neurologiques impliquées dans l'adaptation perceptivo-motrice et dans l'apprentissage de séquence motrice a été permise grâce à des protocoles de double dissociation fonctionnelle.

En 2005, Doyon et Benali distinguent les apprentissages de nouvelles séquences de mouvements et les adaptations aux variations environnementales en s'intéressant à la plasticité cérébrale au cours de l'apprentissage moteur.

Lors de la découverte de la tâche motrice, les structures neurologiques sont communes : le striatum, le cervelet, les régions corticales motrices ainsi que les zones préfrontales, pariétales et limbiques sont activés. Ces structures vont interagir et permettre un apprentissage progressif caractérisé par l'amélioration de la performance pour la tâche motrice. Dans le cas d'un apprentissage séquentiel, l'activité neuronale progresse de l'aire associative motrice vers le striatum sensorimoteur. Alors que pour les adaptations perceptivo-motrices, la progression s'effectue vers les noyaux cérébelleux. Cela signifie que lors de la consolidation de l'habileté motrice, il y a une spécialisation des circuits en fonction de la nature de l'habileté motrice.

L'adaptation perceptivo-motrice implique la boucle cortico-cérébelleuse et exclut le striatum tandis que l'apprentissage de séquences motrices repose sur la boucle cortico-striatale et exclut le cervelet, les plasticités sont donc inversées.

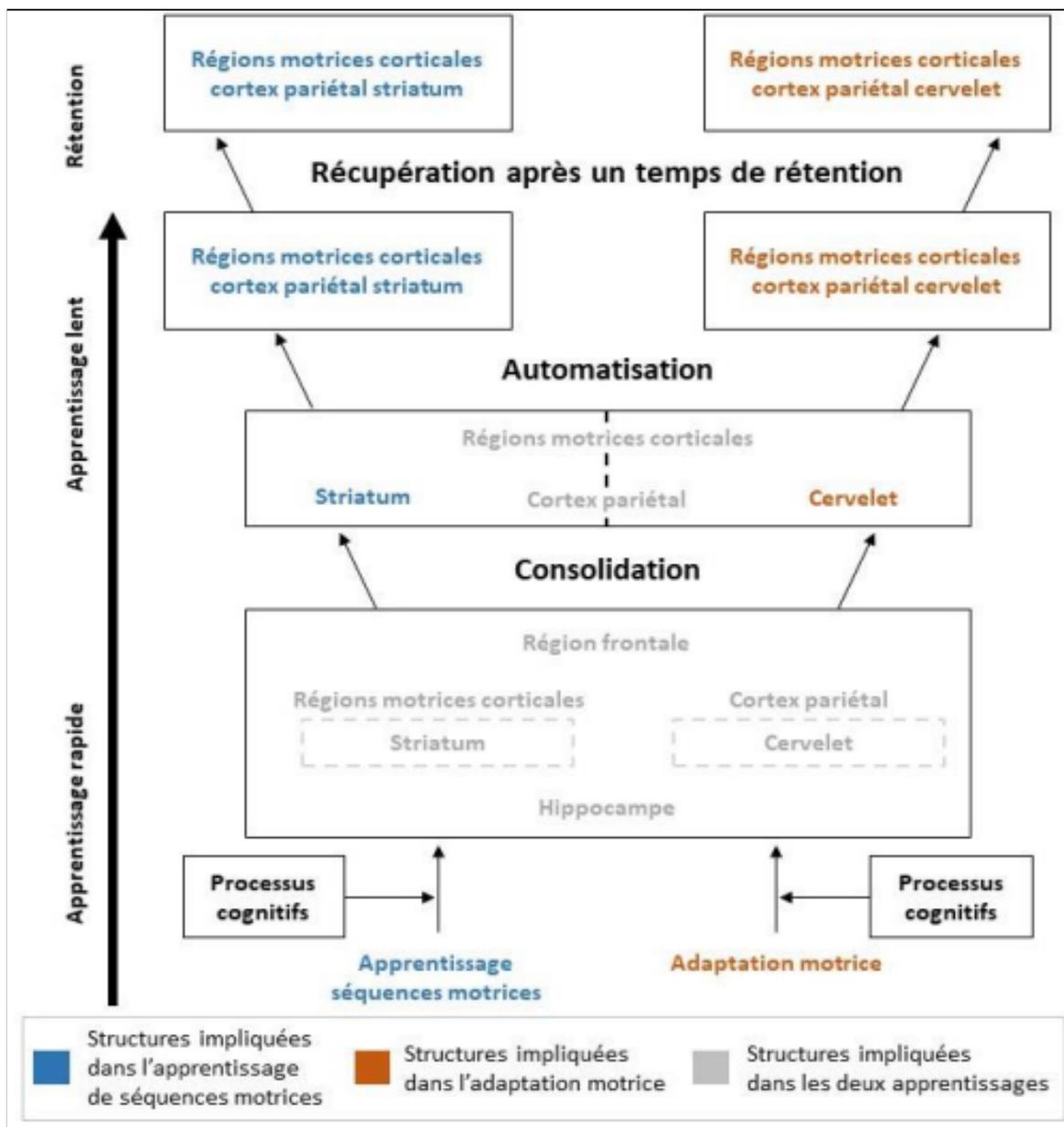


Figure 9 : Structures neurologiques impliquées dans l'apprentissage procédural (Doyon & Benali, 2005, traduction)

La connaissance des structures neurologiques impliquées dans l'APPM va permettre de mieux cerner les difficultés spécifiques des individus selon leurs atteintes neurologiques. En psychomotricité, cela va permettre d'orienter plus spécifiquement la rééducation. Cependant, il est primordial de connaître en amont l'évolution des capacités d'apprentissage procédural chez des individus sains.

3.2. Apprentissage procédural typique durant le développement

L'apprentissage procédural est un processus précoce qui intervient dès le plus jeune âge. Des études ont d'ailleurs démontré l'existence d'une mémoire procédurale perceptivo-motrice dès l'âge de 3 mois (RoveeCollier & al. ; cités par Martins & al., 2006).

Zwart et ses collaborateurs (2018) se sont intéressés au développement de l'apprentissage procédural au travers d'une revue systématique. Trois modèles de développement en sont ressortis : une invariance développementale (Reber, 1993), un pic d'apprentissage chez les jeunes adultes (Thomas & al., 2004 ; Lukács & Kemény, 2014), la présence d'un plateau dès l'enfance qui décline au cours du développement (Janacsek & al., 2012).

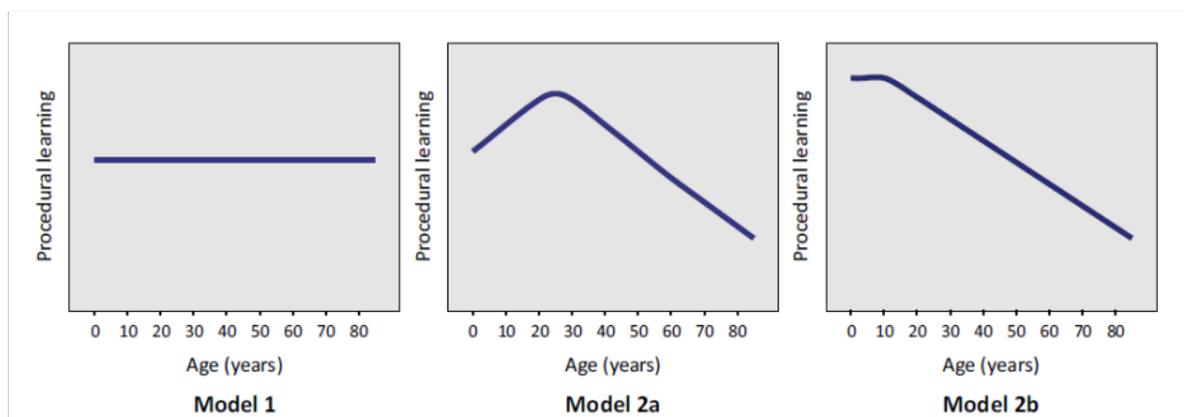


Figure 10 : Représentation schématique des modèles de développement de l'apprentissage procédural (Zwart & al., 2018)

L'analyse approfondie de ces modèles a permis de conclure sur la présence d'un changement des compétences d'apprentissage procédural en fonction de l'âge (Zwart & al., 2018). Cela est donc en faveur des modèles 2a et 2b sans pour autant en privilégier un des deux. Selon Zwart, les modèles diffèrent du fait d'une divergence entre les traitements statistiques de normalisation des deux études. Cependant, les deux modèles s'accordent sur une dégradation des processus d'apprentissages procédural avec l'âge, du moins à partir de l'âge adulte. Cela implique que l'apprentissage procédural chez un jeune adulte nécessite moins d'entraînement que pour une personne âgée sans pathologie. Cependant, malgré l'omniprésence de l'apprentissage procédural tout au long de la vie humaine, la façon dont celui-ci est affecté par l'âge n'est pas encore entièrement comprise. Concernant l'apprentissage procédural perceptivo-moteur, des études ont mis en évidence un déclin des habiletés motrices avec l'âge autant pour des tâches d'adaptation motrice (Nemanich, 2015) que pour des tâches de SRTT (Janacsek et al., 2012).

L'APPM est au cœur du métier de psychomotricien, en effet les troubles psychomoteurs sont des troubles perceptivo-moteurs qui affectent les fonctions d'exploration et d'action (Corraze, 2010). Au sein de l'APPM, l'adaptation perceptivo-motrice repose sur la perception de l'environnement afin d'adapter l'action aux contraintes présentes. L'apprentissage de séquences motrices nécessite quant à lui l'élaboration de séries d'actions en fonction des informations données par l'environnement. C'est ce lien entre l'environnement et l'action qui va conditionner la réussite ou l'échec de l'apprentissage.

Nous venons de voir que les processus d'APPM déclinent avec l'âge, mais ils peuvent également être affectés par certaines pathologies, notamment en présence de troubles neurodéveloppementaux (TND) et neurologiques. La partie suivante s'attache à développer les multiples perturbations pouvant affecter l'APPM tout au long du développement. Deux récentes revues de la littérature ont permis de synthétiser les résultats obtenus au sein de recherches utilisant des paradigmes expérimentaux pour évaluer l'APPM. En effet, les études portant sur les enfants ont fait l'objet du mémoire d'Yzia Clausses (2020) tandis que celles étudiant les adultes et personnes âgées figurent au sein du mémoire de Claire Scotté-Baranoff (2020). Nous présenterons donc ici un résumé de leurs résultats.

PERTURBATION DE L'APPM AU COURS DU DÉVELOPPEMENT

1. Théorie du déficit d'apprentissage procédural dans les troubles neurodéveloppementaux

1.1. Les troubles neurodéveloppementaux

Selon les classifications médicales (CIM-11 et DSM-5), les troubles neurodéveloppementaux (TND) sont un ensemble d'affections qui débutent durant la période du développement. Ils entraînent des difficultés significatives dans l'acquisition et l'exécution de fonctions spécifiques intellectuelles, motrices ou sociales. L'étiologie présumée pour les TDN est complexe et pour beaucoup d'individus, elle est inconnue. La prévalence des TND varie selon les définitions de 5 à 15 %. Ils sont classés en 7 catégories :

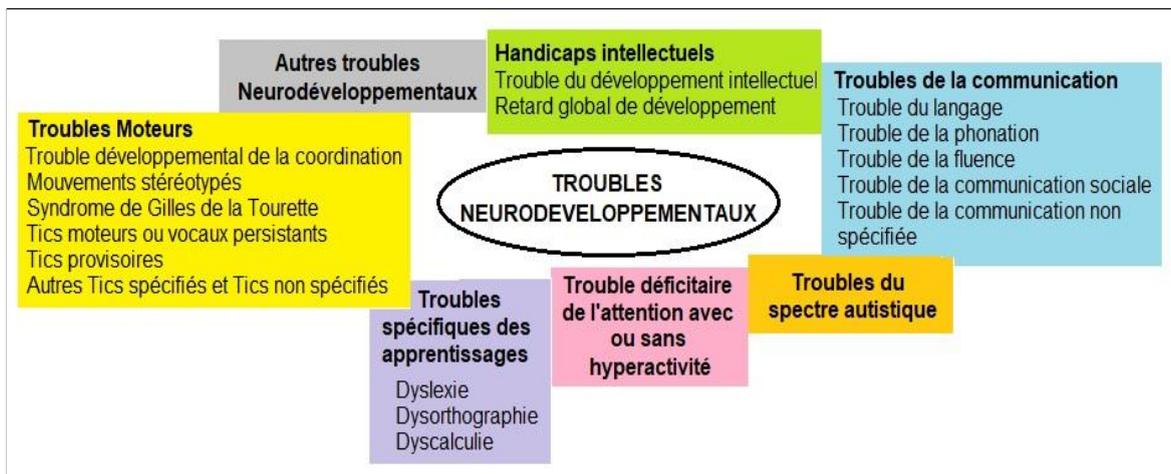


Figure 11 : Classification des troubles neurodéveloppementaux (DSM-V, 2015)

1.2. Modèle de Nicolson et Fawcett 2007

Selon Nicolson et Fawcett (2007), un déficit au niveau des systèmes d'apprentissage déclaratif et procédural serait commun aux troubles neurodéveloppementaux et permettrait d'expliquer leur fréquente association.

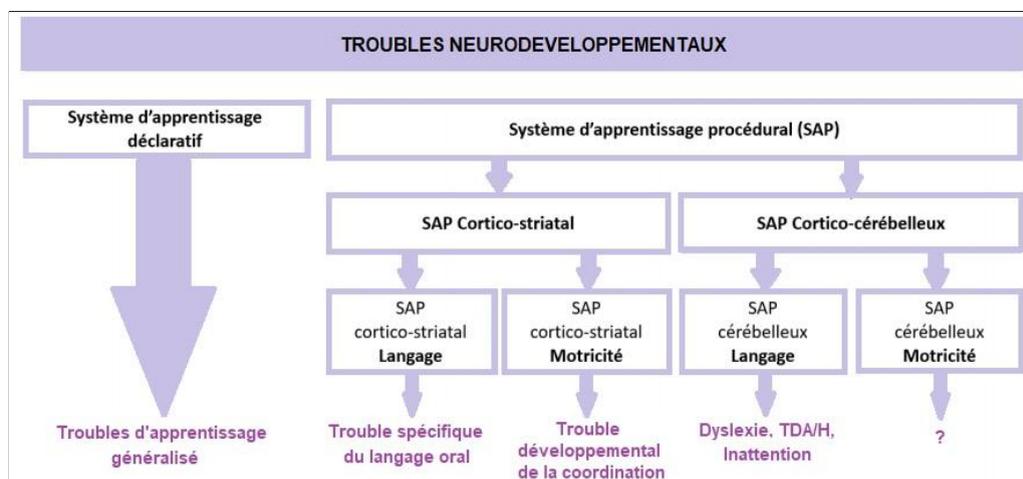


Figure 12 : Modèle explicatif des troubles neurodéveloppementaux en fonction du niveau des capacités d'apprentissage déclaratif et procédural (Nicolson et Fawcett, 2007)

Ce modèle est basé sur les travaux de Doyon et collaborateurs (Doyon et al., 2003; Doyon & Benali, 2005). Ainsi, les atteintes du système procédural n'ont pas les mêmes conséquences en fonction du circuit impliqué.

Une atteinte sur le circuit cortico-striatal peut provoquer un trouble spécifique du langage oral (TSLO) ou un trouble développemental de la coordination (TDC). D'autre part, une atteinte sur le circuit cortico-cérébelleux peut induire une dyslexie, un trouble déficitaire de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDA/H) ou des troubles moteurs ne correspondant pas encore à un trouble spécifique identifié à ce jour. Les conséquences de l'atteinte quel que soit le circuit dépendent du versant concerné (moteur ou langagier). Les troubles spécifiques des apprentissages sont quant à eux mis dans une catégorie à part car ils sont la conséquence d'une atteinte du système d'apprentissage déclaratif.

Les troubles neurodéveloppementaux ne se manifestent pas tous par des difficultés d'apprentissage procédural perceptivo-moteur et d'autres pathologies comme les maladies dégénératives peuvent elles aussi présenter ce genre de difficultés. Nous allons alors nous pencher sur les différentes perturbations de l'APPM au cours des grandes étapes du développement : l'enfance, l'âge adulte et le vieillissement.

2. Perturbations de l'APPM dans les TND chez l'enfant

D'après l'Organisation mondiale de la santé (OMS, 2008), la prévalence des TND dans le monde chez les enfants de moins de 15 ans est estimée à 5 %. Certains de ces troubles sont assez peu étudiés et mériteraient davantage de publications tandis que d'autres, plus étudiés, présentent des résultats divergents concernant le déficit ou la préservation du processus d'apprentissage procédural de séquences.

2.1. TND présentant de possibles déficits d'APPM

2.1.1. Dyslexie

La dyslexie se retrouve dans les troubles spécifiques des apprentissages, il s'agit d'un déficit en lecture s'expliquant par des difficultés dans la reconnaissance exacte et fluide des mots ainsi qu'un mauvais décodage associé à des difficultés en orthographe. La théorie de Nicolson & Fawcett (2007) portant sur le déficit procédural au sein des troubles neurodéveloppementaux met en avant une atteinte du circuit cortico-cérébelleux langagier dans la dyslexie. L'impact du cervelet (Nicolson, Daum, Schugens, Fawcett, & Schulz, 2002) pourrait donc avoir une incidence sur l'altération de l'apprentissage procédural. Cela pourrait alors justifier selon Nicolson et al. (2010) une faiblesse dans les habiletés phonologiques et la reconnaissance des mots.

Les études portant sur l'altération de l'APPM dans la dyslexie sont nombreuses, en revanche leurs résultats sont contradictoires ; il est alors difficile de statuer sur une préservation ou une altération de l'APPM dans la dyslexie. Dans une méta-analyse de 2013, Lum et al. ont synthétisé les résultats de 14 études comparant la performance des tâches de SRTT chez des enfants dyslexiques et des témoins de même âge et ont trouvé des preuves solides d'un déficit d'apprentissage implicite associé à la dyslexie. Ces études contredisent une étude antérieure à grande échelle de 422 enfants (Waber et al., 2003), dans laquelle les performances de la SRT ne permettaient pas de distinguer les bons et les mauvais lecteurs. Il est important de tenir compte de la complexité de l'apprentissage de la lecture ainsi que des compensations possibles du système déclaratif au sein de cet apprentissage. On pourrait s'attendre à retrouver des difficultés d'apprentissage d'adaptation perceptivo-motrice dans la dyslexie du fait de l'altération du cervelet. Selon l'étude de Vicari et al. (2005), les enfants atteints de dyslexie développementale étaient déficients à la fois sur la tâche d'adaptation perceptivo-motrice (dessin en miroir) que sur la tâche de temps de réaction. L'altération concernerait selon eux les différentes compétences de l'apprentissage procédural.

2.1.2. Trouble Spécifique du Langage

Le TSL se retrouve dans les troubles de la communication et se caractérise par des difficultés d'acquisition et utilisation du langage, qu'il soit sous la forme écrite, orale ou signée. Ces difficultés sont la conséquence d'un manque de compréhension ou de production. Ce trouble est dû à une altération des circuits corticaux-striataux langagiers, entraînant une altération du processus procédural (Nicolson & Fawcett, 2007).

De nombreuses études ont évalué l'apprentissage procédural perceptivo-moteur séquentiel dans le TSL. Même si les résultats montrent des disparités, un consensus prône une altération de ce processus. En effet, plusieurs études ont mis en évidence une altération de l'apprentissage de séquence en comparaison à des groupes contrôles (Clark & Lum, 2017; Desmottes et al., 2016; Gabriel et al., 2013; Hedenius et al., 2011; Hsu & Bishop, 2014; Lukács & Kemény, 2014; Lum et al., 2010, 2012; Park et al., 2018; Sengottuvel & Rao, 2013; Tomblin et al., 2007). L'importante variation des paradigmes expérimentaux entre les études pourrait être à l'origine des divergences au sein des résultats. Il se pourrait également que le déficit procédural ne soit pas intrinsèquement lié au TSL mais existe seulement dans une partie de cette population ; les différences de résultats seraient alors liées aux échantillons inclus dans les études. Concernant l'adaptation motrice, Desmottes et coll. (2016), ont montré que les enfants avec TSL ont généralisé la compétence de dessin en miroir de la même manière que les témoins suggérant que l'apprentissage d'une tâche procédurale non séquentielle est préservé dans le trouble spécifique du langage.

2.1.3. Trouble Développementale de la Coordination

Il s'agit d'un trouble neuro développemental caractérisé par des difficultés importantes dans l'acquisition et l'exécution d'habiletés motrices coordonnées se traduisant par de la maladresse, de la lenteur et de l'imprécision (DSM-V, 2015). Un dysfonctionnement du circuit cortico-striatal moteur serait, selon le modèle de Nicolson et Fawcett (2007), présent au sein de ce trouble de la production motrice. Une altération des capacités d'apprentissage perceptivo-motrices séquentielles directement reliées à ce circuit cérébral (Doyon et al., 2017) ne serait donc pas étonnante. D'autant plus que les enfants TDC présentent des difficultés dans de nombreuses tâches procédurales du quotidien (habillage, vélo, écriture ...).

De manière surprenante, très peu d'études se sont intéressées au possible déficit d'APPM dans le TDC, et parmi elles, les résultats divergent autant pour les compétences d'apprentissage séquentiel que pour celles d'adaptation perceptivo-motrice.

Du côté de l'apprentissage séquentiel, les études de Wilson et al. (2003) et Lejeune et al. (2013) s'orientent vers une préservation de l'apprentissage des séquences. Pourtant en 2011, Gheysen et ses collaborateurs indiquent au contraire une altération de cette capacité.

Selon eux, les problèmes d'apprentissage séquentiel des enfants TDC pourraient se situer au stade de la planification motrice plutôt que de l'acquisition de séquences. Wilson et ses collaborateurs (2017), mettent d'ailleurs en évidence des différences dans la structure et la fonction cérébrale des enfants TDC par rapport aux enfants témoins. Celles-ci peuvent affecter la planification anticipative et réduire l'automatisation des habiletés motrices.

Pour les compétences d'adaptation perceptivo-motrice, elles semblent être préservées dans le TDC pour Lejeune et al. (2015) sur tâche de pointage avec inversion image/joystick, pour Cantin et al. (2007) sur une tâche d'adaptation prismatique et pour King et al. (2011) sur une tâche de suivi de cible avec un curseur orienté à 60°. En effet, ces auteurs concluent que les enfants avec TDC sont capables de s'adapter de manière similaire aux témoins à des perturbations visuomotrices. Pourtant six études vont à l'encontre de ces conclusions en prônant une altération de la fonction cérébelleuse dans le TDC. Kaeger et al. (2004) soumettent des enfants avec TDC et des enfants témoins à une tâche de dessin avec une rotation de rétroaction visuelle de 45°. Ils montrent que les enfants avec TDC sont moins affectés par la distorsion de rétroaction suggérant un modèle interne bien moins défini. Plus tard, en 2006, ils s'intéressent à l'impact de la nature de la perturbation (Brusque ou progressive) pour les enfants avec TDC sur une tâche une fois encore de dessin avec une rotation de rétroaction visuelle. Ils mettent alors en évidence que les enfants avec TDC mettent à jour leur carte interne plus efficacement lors d'une exposition à une perturbation visuomotrice brusque par rapport à une perturbation progressive. Cela suggérerait un impact de la fonction cérébelleuse dans le TDC. Brookes et al. (2007) ont quant à eux utilisé une tâche d'adaptation prismatique sur des enfants avec TDC et ont montré un taux d'adaptation altéré prouvant là aussi un impact de la fonction cérébelleuse. En 2015, deux études utilisant des tâches d'adaptation perceptivo-motrice ont été publiées (Jarus et al. ; Magallon et al.) ; elles ont aussi mis en évidence une altération de cette compétence dans l'apprentissage procédural chez les enfants avec TDC. La dernière étude en date va également dans ce sens avec l'utilisation d'une tâche d'adaptation prismatique (Gomez-Moyan et al., 2019). En effet, l'étude démontre des déficits visuo moteurs procéduraux chez des enfants atteints de TDC.

Finalement, les chercheurs s'accordent à dire que les enfants avec TDC ont des difficultés à apprendre des tâches motrices pourtant ils sont peu nombreux à s'être intéressés aux processus d'APPM au sein de ce trouble moteur.

2.2. TND où l'APPM semble préservé

2.2.1. Syndrome de Gilles de la Tourette

Ce syndrome (SGT) fait partie des TND et se caractérise par la présence de tics moteurs et vocaux chroniques (American Psychiatric Association, 2015). Sa sévérité a tendance à diminuer pour la plupart des enfants durant le passage de l'enfance à l'adolescence et à l'âge adulte.

Il débute dans l'enfance et se manifeste suite à des anomalies du circuit fronto-striatal (Debes et al., 2014; Mink, 2001; Müller-Vahl et al., 2009).

Ce circuit étant impliqué dans l'apprentissage séquentiel (Doyon et al., 2003, 2009, 2017), des chercheurs se sont intéressés aux capacités d'apprentissage procédural perceptivo-moteur pour des sujets atteints du Syndrome de Gilles de la Tourette. La préservation des capacités d'apprentissage de séquences motrices a été mise en évidence par trois études (Channon et al., 2003; Takács et al., 2017, 2018). Du fait des comorbidités souvent associées au SGT, notamment avec le TDA/H, on retrouve dans ces études des groupes associant SGT et TDA/H (Channon et al., 2003; Takács et al., 2017). Il en ressort que la comorbidité avec le TDA/H n'entraîne pas de détérioration de l'apprentissage procédural, résultat allant dans le sens d'une préservation de ce processus dans le Syndrome de Gilles de la Tourette. Par ailleurs, l'étude la plus récente de Takács (2018) révèle même une amélioration du processus d'apprentissage séquentiel chez des sujets atteints du SGT par rapport au groupe contrôle, mais toutefois avec une possible altération du processus de consolidation (Takács et al., 2018). Marsh et al. (2005) se sont intéressés à l'adaptation perceptivo-motrice chez des sujets avec SGT en les comparant à des sujets témoins sur des tâches de poursuite de cible et de traçage avec miroir. Ils ont mis en évidence qu'il n'y avait pas de différence entre les deux groupes.

Finalement, malgré une atteinte du circuit fronto-striatal, l'apprentissage procédural perceptivo-moteur est préservé dans le SGT.

2.2.2. Trouble Déficitaire de l'Attention avec ou sans Hyperactivité

Il s'agit d'un trouble neurodéveloppemental associant difficultés d'attention, hyperactivité et impulsivité. Les symptômes apparaissent dans l'enfance et évoluent avec l'âge. Le TDA/H entrave le développement des enfants en nuisant à leurs apprentissages scolaires, en dégradant leur vie familiale et en altérant les relations avec leurs pairs (Bange, 2014). À l'adolescence et à l'âge adulte, le TDA/H ne disparaît pas. Certains symptômes évoluent, s'atténuent ou bien disparaissent ; mais d'autres difficultés émergent affectant durablement la vie quotidienne personnelle, familiale, sociale et professionnelle.

Des anomalies structurelles et fonctionnelles au niveau des ganglions de la base et du cervelet ont été révélées par des études en neuro-imagerie (McLeod et al., 2014; Valera et al., 2007). Ces régions, impliquées dans l'apprentissage séquentiel, pourraient induire un déficit d'APPM en étant atteintes. Par ailleurs, l'inattention dans le TDA/H serait due selon la théorie de Nicolson et Fawcett (2007) à un déficit du circuit cortico-cérébelleux langagier, tout comme la dyslexie. Le cervelet étant essentiel au début de l'apprentissage séquentiel (Doyon et al., 2009), on peut s'attendre à ce que l'APPM soit déficitaire chez les sujets atteints de TDA/H.

Or, trois études s'étant interrogées sur les capacités d'apprentissage procédural séquentiel chez des enfants avec TDA/H ont révélé une préservation de l'apprentissage de séquences motrices (Barnes et al., 2010; Karatekin et al., 2009; Takács et al., 2017). Cependant, il pourrait y avoir une particularité dans le processus d'apprentissage procédural de séquences chez les TDA/H car leur courbe d'apprentissage diffère des sujets neurotypiques appariés (Barnes et al., 2010).

Il faudrait mener plus de recherches sur le TDA/H notamment en incluant des tâches d'adaptation perceptivo-motrice mais globalement, les chercheurs s'accordent sur la préservation de l'APPM dans le TDA/H.

2.2.3. Trouble du Spectre de l'Autisme

Le TSA fait partie des troubles neurodéveloppementaux, il se caractérise par des déficits persistants de la communication et des interactions sociales ainsi qu'un caractère restreint et répétitif des comportements, des intérêts ou des activités (DSM-V, 2015). Le retentissement fonctionnel du TSA s'observe dans de nombreux domaines tels que la scolarité, les apprentissages, la vie quotidienne... A l'âge adulte, l'indépendance de la personne TSA pourra être impactée par une rigidité persistante et des difficultés face aux situations nouvelles.

Le trouble du spectre de l'autisme est associé à des anomalies cérébelleuses (Courchesne et al., 1988, Rumsey, 1990) et à des déficits de la fonction motrice (Ohta, 1987), de la mémoire non déclarative (Benvenuto, Pennington et Rogers, 1996) et de l'apprentissage procédural, en particulier des séquences (Mostofsky et al., 2000 ; Sigman et Ungerer, 1984).

Cependant, des études plus récentes n'ont pas identifié d'altération de l'apprentissage procédural chez les individus avec TSA (Barnes et al., 2008; Brown et al., 2010; Gordon & Stark, 2007; Izadi-Najafabadi et al., 2015; Nemeth et al., 2010; Zwart et al., 2018). Par ailleurs, des méta-analyses ont montré que les personnes atteintes de TSA ont des performances comparables à celles de leurs pairs au SRTT (Foti et al., 2015, Obeid et al., 2016). Sur une tâche de poursuite de cibles, les enfants avec TSA obtiennent des résultats similaires au groupe témoin concernant l'apprentissage de la procédure (Sparaci et al., 2015). Ces résultats suggèrent ainsi une préservation de l'apprentissage procédural séquentiel dans le TSA.

3. Altérations de l'APPM à l'âge adulte et au cours du vieillissement

3.1. Déficit d'APPM à l'âge adulte

3.1.1. Persistance des TND

L'étude des processus d'APPM chez les adultes atteints de TND ont fait l'objet d'un nombre très restreint de recherches s'intéressant exclusivement à l'apprentissage de séquences motrices. En effet, cela fait peu de temps que la recherche s'intéresse aux TND sur la population adulte.

On retrouve principalement la dyslexie mais les résultats diffèrent entre les différentes études. Rüsseler & al. (2006) ont comparé des adultes lecteurs dyslexiques à des lecteurs normaux sur une tâche de SRTT ainsi que sur une tâche d'apprentissage de grammaire artificielle. L'apprentissage implicite s'est révélé similaire au sein des deux groupes. En 2006, Menghini & al. ont évalué l'apprentissage implicite en administrant une version classique de la tâche de SRTT à des adultes. Les résultats ont montré des habiletés d'apprentissage séquentiel réduite chez les sujets atteints d'une dyslexie développementale. Cette étude va dans le sens d'autres recherches ayant mis en évidence avec des tâche de SRTT un déficit d'apprentissage moteur implicite chez des enfants et des adultes atteints de dyslexie développementale (Vicari et al., 2003, Vicari et al., 2005, Howard et al., 2006, Stoodley et al., 2006).

Cependant, Laasonen & al. (2014) ont étudié l'apprentissage implicite une fois de plus au travers d'une tâche de SRTT chez les adultes (18-55 ans) avec dyslexie ou avec déficit de l'attention / hyperactivité et chez des adultes témoins. Les résultats ne montrent pas de différence entre les trois groupes pour l'apprentissage implicite de séquences.

Devant le constat de résultats mitigés avec des preuves d'apprentissage moteur implicite à la fois altéré et intact, Lum & al. (2013) ont entrepris une recherche systématique examinant l'apprentissage procédural à l'aide de tâches SRTT pour des sujets dyslexiques. Ils trouvent qu'en moyenne, les sujets dyslexiques ont de moins bonnes capacités d'apprentissage procédural que les sujets témoins. Chez des sujets adultes, il serait néanmoins possible que le système de mémoire déclarative parvienne à compenser les déficits de mémoire procédurale. Les différences entre les personnes dyslexiques et les personnes témoins seraient les plus grandes dans la petite enfance et les plus petites à l'âge adulte (Lum & al., 2013).

Adi-Japha et al. (2011) ont quant à eux soumis des individus adultes avec et sans TDAH à un apprentissage de séquence de mouvement de doigts. Les résultats obtenus suggèrent que l'acquisition et la consolidation de la mémoire des habiletés motrices sont atypiques dans le TDAH. En effet, malgré des résultats similaires d'apprentissage procédural entre les deux groupes, le groupe de sujets TDAH se situe en dessous du groupe témoin durant la phase de consolidation de la mémoire.

Par ailleurs, quelques études se sont penchées sur l'apprentissage séquentiel chez les adultes avec TSA (Travers et al. (2010) ; Sharer et al. (2016) ; Zwart et al. (2017)). Ces études s'accordent à dire que l'apprentissage séquentiel est intact chez les adultes atteints de TSA.

En revanche, aucune étude portant sur les troubles neurodéveloppementaux ne s'est intéressée aux processus d'APPM chez les sujets adultes avec TDC. Pourtant on associe souvent ce trouble à des difficultés d'apprentissage moteur. En effet, les individus avec TDC peuvent avoir du mal lors d'une action motrice à planifier la tâche en fonction des paramètres spatiaux du mouvement, à calibrer l'amplitude de leurs gestes et à organiser les étapes du mouvement. Mais ils présentent également des difficultés à effectuer une action coordonnée en évaluant le timing et la force requise durant le mouvement tout en ajustant le mouvement lorsque les exigences changent (Franc et Nesensohn, 2016). De plus, les résultats des études portant sur les enfants TDC s'accordent pour mettre en avant des difficultés à apprendre des séquences motrices. Or, les difficultés motrices présentes au sein du trouble développemental de la coordination persistent à l'âge adulte (Kirby, Edwards, Sugden et Rosenblum, 2010). On s'attend alors à ce que des adultes atteints de TDC présentent des processus d'APPM déficitaires.

3.1.2. Pathologies psychiatriques

Au sein des pathologies psychiatriques, c'est la schizophrénie qui a fait l'objet du plus grand nombre d'études concernant l'APPM. Cela peut s'expliquer par le fait que les patients atteints de schizophrénie présentent un dysfonctionnement du circuit corticostriatal (Carlsson et Carlsson, 1990) impliqué dans l'apprentissage de séquences motrices (Doyon & Benali, 2005). Reiss & al. (2006) ont souligné un manque relatif d'activation striatale chez les patients schizophrènes cohérent avec les preuves convergentes de dysfonctionnement striatal dans la schizophrénie.

Plusieurs études ont cherché à savoir si les personnes atteintes de schizophrénie présentaient une performance altérée sur des tâches de SRTT (Exner & al., 2006 ; Foerde & al., 2008 ; Pedersen & al., 2008 ; Siegert & al., 2008). De manière générale, elles font ressortir une atteinte de l'apprentissage séquentiel mais à des degrés de sévérité variables d'une étude à l'autre. Selon Exner & al. (2006), les sujets atteints de schizophrénie sont gravement altérés sur l'apprentissage moteur implicite spécifique à la séquence. Tandis que la méta-analyse de Siegert & al. (2008) conclut sur l'existence d'une altération modérée de l'apprentissage séquentiel implicite chez les personnes atteintes de schizophrénie. Ces déficits mis en exergue par des tâches de SRTT ont parfois été controversés en pointant du doigt l'impact des traitements neuroleptiques. Pedersen & al. (2008) ont pu mettre en évidence que l'apprentissage des séquences, défectueux chez les patients schizophrènes, n'était pas lié à la dose quotidienne de neuroleptique.

Ils concluent alors que le déficit d'apprentissage séquentiel est inhérent à la schizophrénie et serait cohérent avec un dysfonctionnement fronto-striatal (Pedersen & al., 2008).

D'autres pathologies psychiatriques ont elles aussi fait l'objet de quelques recherches afin de déterminer un possible dysfonctionnement des habiletés d'apprentissage de séquences motrices. Ainsi, des déficiences en termes d'apprentissage moteur implicite ont été trouvées chez des patients présentant des troubles obsessionnels-compulsifs (TOC) avec pour origine des dysfonctionnements des systèmes cérébraux fronto-striataux (Kathmann & al., 2005). Des déficits similaires ont été pointés pour les troubles bipolaires avec un dysfonctionnement cérébelleux (Chrobak & al., 2015) et pour la dépression de type mélancolique avec un dysfonctionnement au sein des circuits fronto striataux (Exner & al., 2009). Par ailleurs, les polytoxicomanes chroniques présentent des altérations modérées de l'apprentissage implicite (Stevens & al., 2007). En revanche, aucune altération de l'APPM n'a été mise en évidence dans la trichotillomanie (Rauch & al., 2007) ou chez des patients hospitalisés remis d'une dépression (Pedersen & al, 2009).

3.1.3. Pathologies neurologiques

Les recherches sur les pathologies neurologiques ont principalement pour intérêt de localiser les structures et réseaux cérébraux impliqués dans l'APPM. Ce sont les lésions cérébrales de type accident vasculaire cérébral et traumatisme crânien qui ont le plus été étudiées.

Une lésion cérébrale traumatique légère à modérée ne provoque pas de perturbation marquée de la capacité à apprendre et à se souvenir des informations de modèle en série. (Mutter & al., 1994). Cependant, des commotions cérébrales répétées peuvent induire une suppression de la plasticité synaptique liée à l'apprentissage moteur implicite (De Beaumont & al., 2012).

Concernant les AVC, l'impact sur l'apprentissage séquentiel va dépendre de sa localisation. Selon Doern & al. (2016), l'apprentissage implicite d'une séquence motrice est préservé chez les patients victimes d'un AVC. Au niveau des noyaux gris centraux, les chercheurs ont souligné que les individus victimes d'AVC ne découpent pas les éléments d'une séquence de la même façon que les témoins pour mieux la mémoriser (Boyd & al., 2009). Au niveau du cervelet, les patients ont montré un apprentissage moteur significatif (Dirnberger & al., 2013). Il a également été montré qu'avec une pratique prolongée, les personnes ayant subi un AVC unilatéral sont capables d'apprendre implicitement des séquences motrices (Orell, 2007).

Du côté des lésions cérébrales, les impacts sur l'APPM ont été évalués au travers de tâches de SRTT et de tâches d'adaptation motrice. Les patients avec des lésions préfrontales montrent une altération des capacités d'apprentissage séquentiel (Beldarrain & al., 2002). Cependant, il a été montré que l'apprentissage de séquences d'actions structurées de manière hiérarchique n'est pas altéré chez les patients présentant une lésion préfrontal-cortex (Koch, 2006).

Lorsque des dommages sont subis par le lobe pariétal droit, l'apprentissage séquentiel implicite peut malgré tout avoir lieu (Berryhill, 2010). Parallèlement, lorsque ce sont les noyaux gris centraux qui subissent des lésions, l'apprentissage implicite n'est pas altéré pour une séquence motrice à 12 éléments. Néanmoins, les sujets ont montré plus de difficultés à améliorer leurs compétences générales avec la tâche de temps de réaction indépendamment de l'apprentissage spécifique à la séquence (Exner, 2006).

Des altérations sévères de l'apprentissage de nouvelles séquences ont été observées plutôt chez des patients présentant des lésions cérébelleuses focales (Molinari et al., 1997, Gomez-Beldarrain et al., 1998). En revanche, les lésions cérébelleuses ont fait plus particulièrement l'objet de protocoles utilisant l'adaptation motrice. De manière générale, les patients cérébelleux présentent un déficit d'adaptation motrice (Bernard & Seidler, 2013; Donchin et al., 2012; Lang & Bastian, 2002; Sanes et al., 1990). Cela n'est pas surprenant car il a été montré que le cervelet joue un rôle crucial dans l'APPM notamment dans des tâches d'adaptation perceptivo-motrice (Doyon & Benali, 2005).

Des chercheurs se sont également intéressés aux lésions médullaires, ils ont pu mettre en évidence qu'une lésion de la moelle épinière en l'absence de lésion cérébrale concomitante est associée à un déficit d'apprentissage de la séquence motrice implicite spécifique (Bloch & al., 2016). Les personnes atteintes de lésions médullaires, comme les personnes atteintes d'un traumatisme crânien, doivent alors bénéficier d'une rééducation cognitive répondant à leurs profils neuropsychologiques c'est-à-dire prenant en compte leurs difficultés pour l'apprentissage procédural perceptivo-moteur.

3.2. Vieillesse et pathologies neurodégénératives

La maladie d'Alzheimer et la maladie de Parkinson sont des pathologies neurodégénératives présentant des atteintes de structures cérébrales différentes. Dans la maladie d'Alzheimer, l'atteinte est sur-corticale tandis que dans la maladie de Parkinson, l'atteinte est sous-corticale.

3.2.1. Maladie d'Alzheimer

La maladie d'Alzheimer est une maladie neurodégénérative présentant trois anomalies neurologiques progressives : la mort neuronale avec une atrophie cérébrale et de l'hippocampe (Coupé & al., 2019), l'apparition de plaques séniles autour des neurones, et une dégénérescence neurofibrillaire intra-neuronale. La maladie débute par une perte de mémoire puis les signes cliniques vont évoluer dans le temps et impacter progressivement l'autonomie des individus.

On retrouve des troubles des fonctions exécutives, de l'orientation spatio-temporelle, puis s'installent des troubles du langage (aphasie), de l'écriture (dysorthographe), du mouvement (apraxie), du comportement, des troubles de l'humeur (anxiété, dépression, irritabilité)... Le tableau clinique va permettre de déterminer le niveau de gravité de la maladie.

L'atteinte neurologique de la maladie d'Alzheimer ne concerne pas les noyaux gris centraux, acteurs principaux de l'apprentissage moteur séquentiel (Anderson, 2013) et par conséquent, l'apprentissage procédural ne devrait pas être impacté.

C'est bien ce qu'on concluent les recherches portant sur les capacités d'APPM au sein de la maladie d'Alzheimer (Ferraro & al, 1993 ; Knopman, 1991 ; Schmitz & al., 2014 ; Van Tilborg & al., 2010). L'apprentissage procédural est certes préservé, il serait même maintenu dans la mémoire à long terme (Knopman, 1991). En revanche, le stade de la maladie peut faire varier les résultats ; Ferraro et ses collaborateurs (1993) montrent que dès le stade léger de démence, les capacités d'apprentissage procédural des sujets atteints d'Alzheimer se dégraderait fortement. Par ailleurs, il a été mis en évidence que le mode d'apprentissage par essai-erreur se dégrade très tôt dans la MA (Schmitz & al., 2014). En conclusion, dès le premier stade de la maladie d'Alzheimer, ce n'est pas l'apprentissage procédural qui va se dégrader mais plutôt certains modes d'encodage des informations à traiter. Dès lors qu'une démence va s'aggraver, les habiletés d'apprentissage procédural vont hautement être altérées.

3.2.2. Maladie de Parkinson

La maladie de Parkinson est une affection dégénérative d'étiologie inconnue touchant initialement les neurones dopaminergiques du locus Niger (ANAES, 2000). Elle se caractérise par les signes cliniques suivants : bradykinésie (souvent associé à une akinésie), rigidité et tremblement de repos. Le locus Niger, c'est-à-dire la substance noire, se situe au niveau du tronc cérébral et est relié avec le striatum. Une atteinte sous corticale laisse alors présager une altération de l'apprentissage procédural chez les patients parkinsoniens. En effet, le striatum est au cœur de l'apprentissage procédural notamment pour l'acquisition de séquences motrices avec la boucle cortico-striatale (Doyon, 2005).

De nombreuses études ont cherché à connaître l'impact de la maladie de Parkinson sur l'apprentissage procédural au travers de paradigmes expérimentaux tels que les tâches de SRTT. Un consensus va plutôt dans le sens d'une altération plus ou moins importante des capacités d'apprentissage de séquences motrices. Les chercheurs s'accordent pour dire que la maladie de Parkinson altère l'apprentissage procédural implicite et que cela est en lien avec une dégradation des noyaux gris centraux (Clark et al., 2014; Ruitenberg et al., 2015). Ils confirment par la même occasion que les noyaux gris centraux sont responsables de l'apprentissage procédural implicite.

La grande hétérogénéité des résultats retrouvée entre les différentes études peut s'expliquer par l'influence des caractéristiques des patients parkinsoniens tels que les traitements médicaux ou la gravité des symptômes moteurs mais également par l'influence des paramètres appliqués aux différents protocoles d'étude. Concernant l'adaptation motrice, cette habileté est préservée dans les maladies impliquant une dégénérescence striatale, comme la maladie de Parkinson (Laforce & Doyon, 2001).

3.2.3. Autres pathologies dégénératives

La dégénérescence cérébelleuse ainsi que la maladie de Huntington ont été étudiées pour connaître leurs conséquences sur les capacités d'apprentissage procédural.

Les résultats obtenus pour la dégénérescence cérébelleuse se contredisent avec d'une part des altérations sévères de l'apprentissage de nouvelles séquences observées chez des patients présentant une dégénérescence corticale diffuse du cervelet (Pascual-Leone et al., 1993). D'autre part, l'apprentissage de séquences motrices est apparu préservé chez des patients avec une dégénérescence cérébelleuse (Spencer & Ivry, 2009). Il est difficile de conclure sur l'altération de l'apprentissage procédural de séquences motrices lors d'une dégénérescence cérébelleuse.

La maladie de Huntington est un trouble neurodégénératif progressif hérité de façon autosomique dominante. Elle provoque des troubles caractéristiques des symptômes moteurs (mouvements choréiformes involontaires, dysarthries, dystonies et rigidité), des symptômes psychiatriques et une démence sous-corticale progressive. Knopman et Nissen (1991) ont constaté que les patients atteints de Maladie de Huntington, y compris ceux atteints d'une maladie bénigne, manifestaient des déficits dans l'apprentissage procédural dans un paradigme de tâche de temps de réaction en série (SRTT). Cette pathologie a donc un impact sur les capacités d'APPM.

Nous avons pu mettre en évidence que beaucoup de pathologies ont fait l'objet d'études de l'apprentissage procédural que ce soit dans le domaine psychiatrique, gériatrique, neurologique ou neuro développemental ainsi qu'à toutes les étapes du développement avec l'emploi massif du protocole de SRTT. Cela a permis de révéler que plusieurs pathologies peuvent avoir un impact sur l'apprentissage procédural, la rééducation de ces patients va donc devoir être adaptée en conséquence. Cette rééducation, notamment en psychomotricité, a pour objectif de permettre au patient d'apprendre ou de réapprendre des habiletés pour être autonome et s'adapter aux situations du quotidien. Pour autant, aucun outil clinique n'a encore été développé pour mesurer les capacités d'apprentissage procédural des patients avant de démarrer une rééducation.

Le large panel de recherches énoncé dans cette partie est fondé sur l'utilisation de tâches de laboratoire pour mesurer les deux grands types d'APPM que sont l'apprentissage de séquences motrices et l'adaptation perceptivo-motrice (Doyon et Benali, 2005). Ces tâches ont largement fait leurs preuves au sein des différentes études et justifient le choix de vouloir s'en inspirer pour construire un test clinique d'évaluation de l'apprentissage procédural perceptivo-moteur. Cela permettrait en effet de pouvoir quantifier une atteinte d'un des deux types d'APPM chez un patient venant consulter pour une rééducation psychomotrice.

Il est important de prendre en compte que les processus d'APPM vont être à l'origine du développement des habiletés motrices. Or, la compétence en différentes habiletés motrices est une condition préalable à la réalisation d'activités quotidiennes et à la participation à des activités physiques qui améliorent la santé pendant l'enfance, l'adolescence et l'âge adulte (Gallahue and al. 1982). Il est donc nécessaire de pouvoir identifier des difficultés d'apprentissage procédural lorsque l'on souhaite effectuer une rééducation sur le niveau moteur.

Les processus d'APPM, qu'ils relèvent de l'apprentissage séquentiel ou de l'adaptation perceptivo-motrice, sont indispensables à l'acquisition d'habiletés motrices. Par ailleurs, l'APPM peut être altéré au sein de nombreuses pathologies au cours du développement. Il semble donc fondamental en psychomotricité de pouvoir évaluer l'APPM avant de mettre en place une rééducation afin de proposer des prises en charge les plus proches des habiletés individuelles des patients. Pourtant, il n'existe aucun outil permettant d'évaluer cliniquement cette capacité lors d'un bilan psychomoteur.

Ce mémoire s'inscrit dans le projet EVAL-APP portant sur la création d'un outil d'évaluation de l'APPM. Il s'agit d'un test comportant deux épreuves évaluant les deux versants de l'APPM : l'apprentissage de séquences et l'adaptation perceptivo-motrice. Pour vérifier la validité de ce test, c'est-à-dire sa capacité à mesurer les processus d'APPM, nous avons choisi d'évaluer les processus d'APPM au cours de tâches écologiques se basant elles aussi sur les deux versants de l'APPM.

Nous avons également fait le choix d'évaluer les habiletés motrices de manière objective avec un test standardisé et validé mais aussi de façon subjective avec un questionnaire portant sur le niveau moteur. L'objectif de ces différentes évaluations est de rechercher des corrélations au sein des résultats afin de valider le dispositif d'évaluation de l'APPM.

Les tâches écologiques permettant d'évaluer la validité de l'APPM dans des situations proches du quotidien font l'objet d'un autre mémoire réalisé par deux étudiantes de MASTER APA. Dans le cadre de ce mémoire de psychomotricité, nous avons pour but de tester la sensibilité du test, seules les évaluations expérimentales de l'APPM et les mesures des habiletés motrices vont nous intéresser. La question à laquelle nous tentons de répondre est la suivante: **Existe-t-il une corrélation entre l'APPM et le niveau moteur, évalué objectivement et subjectivement ?** Notre hypothèse est la suivante : si l'outil expérimental permet de détecter des troubles d'APPM, ses résultats devraient être corrélés au niveau moteur évalué à l'aide du test M-ABC 2. Un questionnaire d'auto-évaluation des capacités motrices sera également proposé aux sujets afin de chercher des corrélations supplémentaires que ce soit avec l'évaluation objective du niveau moteur ou avec les résultats de l'évaluation de l'APPM. Selon une méta-analyse récente (De Meester et al., 2020), il existe une faible corrélation entre le niveau moteur évalué objectivement (tests standardisés) et subjectivement (questionnaires). Nous nous attendons donc à trouver des corrélations plus fortes entre les résultats au test d'APPM et le niveau moteur évalué objectivement que subjectivement. Si l'hypothèse générale n'est pas rejetée, nous pourrions envisager que le test visant à évaluer l'APPM sera sensible, c'est-à-dire capable de discriminer des altérations plus ou moins importantes de l'APPM. Il s'agit ici d'une étude de faisabilité à laquelle seuls trois individus pilotes ont participé pour le moment ; nous ne nous attendons donc pas à obtenir de réelles corrélations à travers cette étude. L'objectif étant plutôt de réaliser des ajustements progressifs à notre protocole afin de perfectionner l'étude et pouvoir l'appliquer sur un plus grand nombre de participants.

MÉTHODE

Pour mener notre étude, il a fallu dans un premier temps rédiger le projet EVAL-APP et le soumettre au comité d'éthique et de recherche (CER²). Nous avons ainsi formulé nos objectifs ainsi que nos conditions expérimentales et le protocole de recherche. D'une part, il fallait élaborer des tâches expérimentales évaluant l'APPM et d'autre part il fallait vérifier que celles-ci soient représentatives des apprentissages réalisés en situation écologique mais aussi représentatives du niveau moteur des individus. Ainsi, deux tâches expérimentales de laboratoire (SRTT et pointage) ont été programmées afin d'évaluer l'apprentissage de séquences motrices et l'adaptation visuo-motrice. Parallèlement, il a fallu imaginer six tâches écologiques reproduisant des situations d'apprentissage de la vie quotidienne. Et enfin, le niveau moteur des participants a prévu d'être mesuré au moyen d'évaluations objectives et subjectives.

La méthode présentée dans la suite de ce mémoire concerne donc le projet EVAL-APP et a obtenu l'avis favorable du CER avant d'être réalisée au stade d'étude de faisabilité.

PARTICIPANTS

Le but de notre étude étant de montrer que nos tâches expérimentales sont valides et sensibles, le critère de jugement choisi est la corrélation. Le nombre de participants requis pour espérer obtenir un seuil de significativité de $p < 0.05$ pour une corrélation de Pearson de 110 participants. Le recrutement concerne des individus âgés de 18 à 40 ans parmi des étudiants et l'entourage des chercheurs et étudiantes impliquées dans l'étude. Des critères de non inclusion ont été décidés : la présence de troubles sensoriels non corrigés (visuel, auditif), de troubles neurologiques ou psychiatriques diagnostiqués et la présence de traumatismes physiques récents pouvant altérer la motricité (plâtre, attelle...). Aucune indemnisation des participants n'est prévue, ils sont remerciés et nous resterons à leur disposition pour d'éventuelles questions sur le projet. Étant donné que nous mesurons durant l'étude des éléments propres aux participants pouvant constituer une atteinte à la vie privée (capacités d'apprentissage, niveau moteur, latéralité ...), nous avons fait en sorte que les performances aux épreuves soient pseudo-anonymisées. Ainsi, chaque participant se verra attribuer un numéro qui sera inscrit sur la feuille de recueil des données par ordinateur. A ce jour, seulement trois sujets pilotes ont participé à l'étude de faisabilité et ont permis d'apporter des ajustements à nos protocoles.

² Le comité d'éthique sur les recherches (CER) est une instance permettant de garantir la déontologie des protocoles de recherche impliquant la personne humaine. <https://www.univ-toulouse.fr/recherche-dynamique/ethique-et-integrite-scientifique>

MATÉRIELS

Pour réaliser l'étude, nous avons eu besoin dans un premier temps d'obtenir le consentement des participants à l'aide d'un formulaire. Un questionnaire d'Oldfield (Oldfield, 1971) nous a permis de connaître la latéralité des participants.

Les habiletés motrices ont été évaluées avec un test BHK (Soppelsa et Albaret, 2013) pour l'écriture, avec certains items du MABC 2 (Marquet Doléac et al., 2016) et avec un questionnaire d'évaluation du niveau moteur perçu inspiré du questionnaire ADC (Kirby et al., 2010). La création de ce questionnaire sera présentée plus loin dans l'exposé. Un ordinateur portable avec souris équipé du logiciel OpenSesame 3.3.8 *Lentiform Loewenfeld*, ont permis de présenter des stimuli visuels et d'enregistrer les réponses avec une grande précision temporelle. Pour les tâches écologiques qui ne seront pas présentées dans ce mémoire, il a fallu également du matériel spécifique ainsi qu'une caméra pour filmer la performance des participants sans que les vidéos soient identifiantes.

PROCÉDURES ET TÂCHES

1. Tâches expérimentales

Pour élaborer les tâches expérimentales il a fallu garder à l'esprit qu'elles devaient facilement pouvoir s'intégrer au sein d'un bilan psychomoteur. Ainsi nous avons veillé à ce qu'elles nécessitent que peu de matériel et qu'elles ne soient pas trop longues. Pour rendre les tâches plus attrayantes, nous avons choisi comme stimulus visuel un oiseau coloré sur un fond représentant un ciel bleu (Figure 13). Nous avons la volonté de créer une interface de type jeu vidéo pour rendre les tâches plus ludiques ; il a fallu néanmoins tenir compte du fait que les éléments ne devaient pas devenir des distracteurs pouvant biaiser la performance.

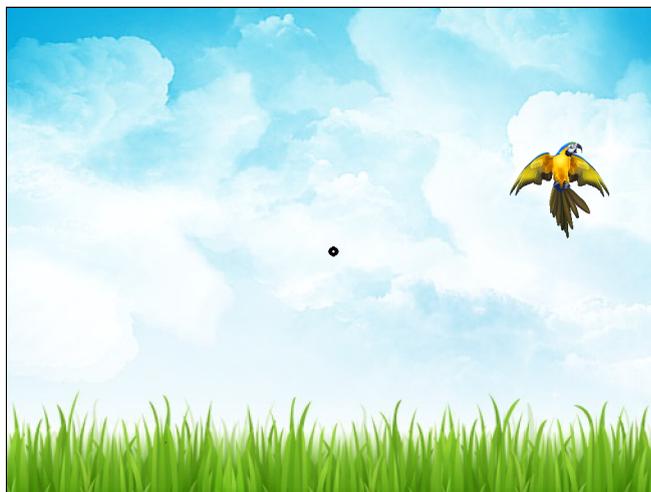


Figure 13 : Interface graphique des tâches expérimentales

Pour le choix des tâches, l'objectif était d'avoir des tâches très proches avec de nombreuses caractéristiques communes pour que rien ne les distinguent hormis le mécanisme d'APPM mis en jeu. La tâche la plus utilisée pour l'apprentissage de séquences étant la SRTT, pour faire une tâche d'adaptation perceptivo-motrice qui y correspond le plus possible, nous avons choisi de proposer parallèlement une tâche de saut de cible. La passation des deux premiers pilotes nous a fait ajouter au préalable une tâche de familiarisation au pointage afin de s'assurer que les participants aient une bonne prise en main du matériel.

Les caractéristiques communes entre les deux tâches expérimentales sont les suivantes :

- Les tâches sont explicites, les participants savent qu'ils réalisent un apprentissage. Ce choix a permis de reproduire les conditions des tâches écologiques.
- La consigne : Les participants doivent être rapides et précis.
- Le nombre de stimuli : Même si le nombre de clics diffère entre les deux tâches, le nombre d'unités d'apprentissage est identique. (8 dans chaque tâches : dans la SRTT, la séquence est présentée 8 fois dans chaque bloc, dans le saut de cible, l'adaptation est réalisée 8 fois pour chacune des positions du stimulus).
- Le positionnement des stimuli : Après avoir réalisé la première passation avec les stimuli positionnés en croix (points cardinaux), nous avons fait le choix de les positionner en arc de cercle pour faciliter la réalisation des tâches, et pour que lors du saut de cible, l'adaptation soit relativement similaire (en termes de longueur et de direction du mouvement et cela quelque soit la position initiale du stimulus).
- La mesure du temps de réaction avec le calcul d'une moyenne pour chaque bloc et du nombre d'erreurs, avec le calcul d'une moyenne pour chaque bloc.
- Le nombre de blocs : 6 blocs sont présentés au sujet, 4 blocs identiques, un 5e bloc bouleverse les conditions d'apprentissage qui sont ensuite rétablies au 6e bloc. Cela permet de montrer qu'il y a bien apprentissage. Pour la SRTT, le bloc 5 propose les stimuli dans un ordre pseudo randomisé, pour le saut de cible, le saut se fait dans un sens différent.

On s'attend alors à observer pour les deux tâches la courbe suivante :

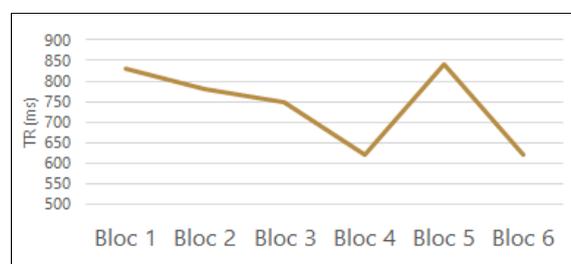


Figure 14 : Courbe d'évolution du temps de réactions attendue pour les tâches expérimentales

A la fin de chaque tâche, nous demandons aux participants de dire sur une échelle de 1 à 5 le niveau de stress suscité par la tâche, le niveau de motivation, le niveau de fatigue mais aussi s'ils ont l'impression d'avoir amélioré leur performance.

1.1. Tâche d'apprentissage de séquences

Il s'agit d'une tâche de SRTT qui mobilise la voie cortico-striatale pour l'apprentissage d'une séquence. Le stimulus visuel va apparaître à l'écran à quatre emplacements possibles disposés en arc de cercle (Figure 15). En réalité, ce stimulus va suivre une séquence d'apparition de 8 positions prédéfinies. (Initialement la séquence était composée de 10 éléments, afin de réduire le temps de la tâche, nous avons diminué la longueur de la séquence).

Le sujet reçoit la consigne suivante : « Un oiseau va apparaître sur l'écran. Il peut apparaître à 4 localisations différentes de l'écran. Il faut cliquer le plus rapidement et le plus précisément dessus dès qu'il apparaît. Il y a 6 blocs en tout ». L'individu sait qu'il est soumis à une situation d'apprentissage mais ignore qu'il s'agit d'une séquence qui se répète.

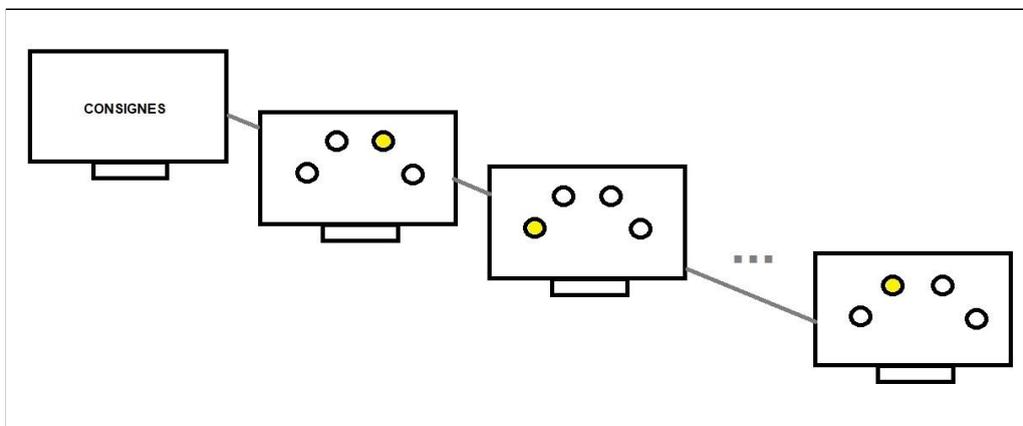


Figure 15 : Présentation de la tâche de SRTT

L'épreuve se déroule ainsi : un bloc correspond à 8 stimuli répétés 8 fois avec la règle suivante : le stimulus ne peut pas apparaître successivement au même endroit, ni revenir à l'emplacement d'où il vient. Durant les 4 premiers blocs, les 8 stimuli correspondent à la séquence. On mesure le temps de réaction du sujet à cliquer sur les stimuli, en théorie ce temps diminue au fur et à mesure que le sujet apprend la séquence. On s'attend donc au cours de ces 4 blocs à observer une réduction progressive du temps de réaction. Cela traduit l'apprentissage général.

Le 5e bloc proposé au sujet correspond en revanche à 8 répétitions de 8 stimuli aléatoires. Suite à cette modification, on s'attend à observer une augmentation du temps de réaction. Le 6e et dernier bloc va réintroduire les 8 stimuli séquencés répétés 8 fois, ainsi on imagine que le temps de réaction va poursuivre sa tendance à diminuer obtenue avant le 5e bloc. La différence entre les blocs 4 - 6 et le bloc 5, traduit l'apprentissage spécifique. S'il y a apprentissage de la séquence, on s'attend à ce que la moyenne des temps de réaction pour chaque bloc nous donne une courbe d'apprentissage similaire à celle de la figure 14.

1.2. Tâche d'adaptation perceptivo-motrice

Cette tâche correspond à l'apprentissage d'une adaptation perceptivo-motrice, c'est la voie cortico-cérébelleuse qui est impliquée ici. Le stimulus visuel peut apparaître à quatre endroits différents disposés en arc de cercle au-dessus d'un point central. Lorsqu'il apparaît, le sujet va devoir aller le pointer avec la souris mais en initiant sa réponse motrice celui-ci va produire un décalage systématique du stimulus (Figure 16). Le sujet va alors devoir s'adapter à ce décalage pour diminuer son temps de réaction. Entre chaque stimulus le sujet revient cliquer sur le point central. La consigne reste la même que pour la tâche de SRTT : « Un oiseau va apparaître sur l'écran. Il peut apparaître à 4 localisations différentes de l'écran. Il faut cliquer le plus rapidement et le plus précisément dessus dès qu'il apparaît. Il y a 6 blocs en tout ».

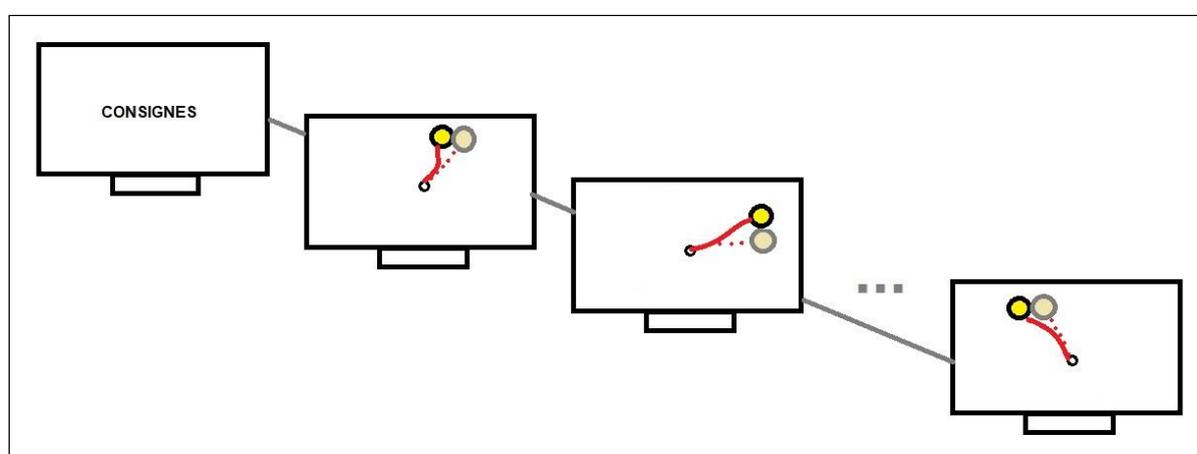


Figure 16 : Présentation de la tâche de sauts de cibles

L'épreuve se déroule ainsi : un bloc correspond à 32 sauts de cibles où toutes les positions apparaissent le même nombre de fois soit 8 fois pour chaque emplacement (blocs pseudo-randomisés). Durant les 4 premiers blocs, le décalage est toujours le même, on s'attend alors à ce que le temps de réaction diminue du fait de l'anticipation du décalage pour adapter le mouvement. Il y a en revanche un saut dans une direction différente au 5e bloc ce qui peut avoir pour conséquence de perturber le temps de réaction du sujet.

Le 6e et dernier bloc va réintroduire le décalage initial, ainsi on imagine que le temps de réaction va poursuivre sa tendance à diminuer obtenue avant le 5e bloc. Comme pour la tâche de SRTT on s'attend à observer une courbe d'apprentissage similaire à la figure 14.

Nous envisageons a posteriori d'ajouter un re-test pour évaluer la fidélité test-retest des tâches expérimentales en conviant une partie des participants à revenir une semaine après la première passation pour être ré-évalués sur les tâches expérimentales.

2. Outils d'évaluation du niveau moteur

L'évaluation des habiletés motrices nécessite de connaître au préalable la latéralité des sujets, pour cela nous avons proposé aux participants un questionnaire de latéralité (Oldfield, 1971) afin d'obtenir leur préférence manuelle évaluée sur 100 sur des tâches du quotidien.

2.1. Evaluation des capacités graphiques

Un test d'écriture a été proposé aux participants (BHK, Soppelsa et Albaret, 2013). L'écriture est une activité motrice très automatisée pouvant nous donner des informations sur le niveau moteur. Celle-ci est évaluée sur la base de deux critères : la qualité de la trace produite (lisibilité, critères géométriques, critères d'organisation spatiale, etc.) et la vitesse d'inscription (nombre de caractères ou de mots écrits par minute).

2.2. Questionnaire d'évaluation du niveau moteur perçu

Pour évaluer le niveau moteur des sujets nous nous sommes inspirés du questionnaire de Kirby (ADC, Kirby et al., 2010) à destination des adultes et portant sur les difficultés rencontrées durant l'enfance mais aussi actuellement dans la réalisation d'activités du quotidien. Il s'agit d'une évaluation subjective sur la base d'un questionnaire d'auto-évaluation. Nous avons ainsi repris ce questionnaire mais en le modifiant pour se centrer sur des aspects purement moteurs. Nous avons donc retiré les questions s'appuyant sur les fonctions exécutives et nous avons également ajouté des questions en lien avec l'utilisation des outils informatiques (clavier, souris, touchpad ...) et avec la pratique d'activités motrices de loisirs (jeux vidéos, sport, instrument de musiques, activités manuelles). Le questionnaire regroupe finalement 35 questions divisées en quatre parties pour garder la même configuration que le questionnaire initial (Annexe 2). La réponse aux questions se fait à l'aide d'une échelle de Likert à quatre échelons (Jamais, Parfois, Souvent, Toujours).

La méthode de cotation pour les questions portant sur les difficultés rencontrées (parties A, C et D) est la suivante : Jamais = 0 point, Parfois = 1 point, Souvent = 2 points et Toujours = 3 points. Pour la partie B, ce ne sont pas les difficultés qui sont évaluées mais la pratique d'activités motrices de loisirs qui reflète généralement de bonnes capacités motrices. La cotation de cette partie est donc inversée.

Finalement, le score total est évalué sur 105 points, la cotation implique qu'un score haut sera représentatif d'un faible niveau moteur et inversement. Ce questionnaire est proposé aux participants avant la passation des tâches expérimentales, la cotation a lieu ultérieurement, les participants ne sont donc pas informés de leur résultat.

2.3. Items sélectionnés au sein du MABC 2

Pour ne pas rendre la passation de l'étude trop longue pour les participants, il a fallu sélectionner seulement certaines épreuves du MABC 2 (Marquet-Doléac et al., 2016).

Notre choix s'est porté sur 3 items :

- La dextérité unimanuelle évaluée à droite et à gauche, il s'agit de retourner une à une 12 petites chevilles sur une planchette percée le plus rapidement possible.
- La dextérité bimanuelle correspondant à une tâche d'assemblage de plusieurs éléments (tiges, boulons, écrous) afin de reproduire une construction en forme de triangle le plus rapidement possible.
- Une épreuve de viser-atrapper évaluée à droite et à gauche durant laquelle il s'agit d'utiliser une seule main pour lancer et rattraper une balle contre un mur.

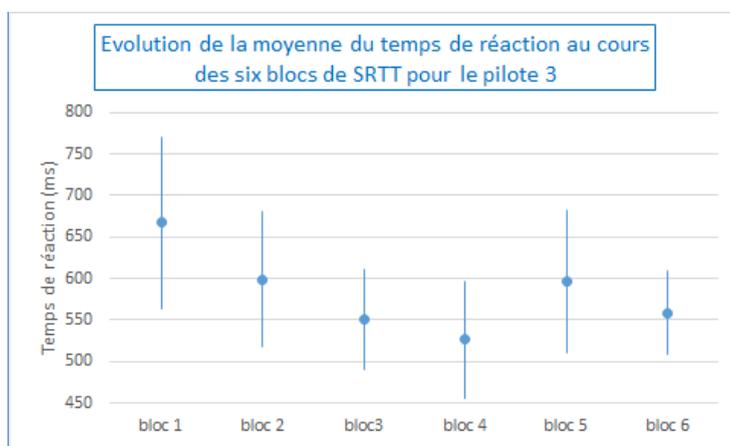
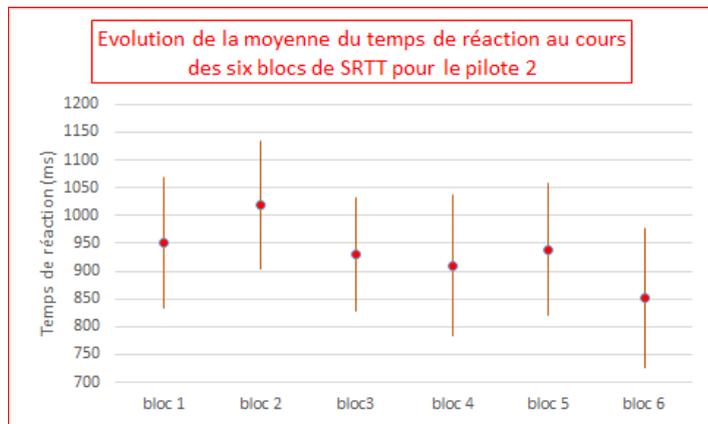
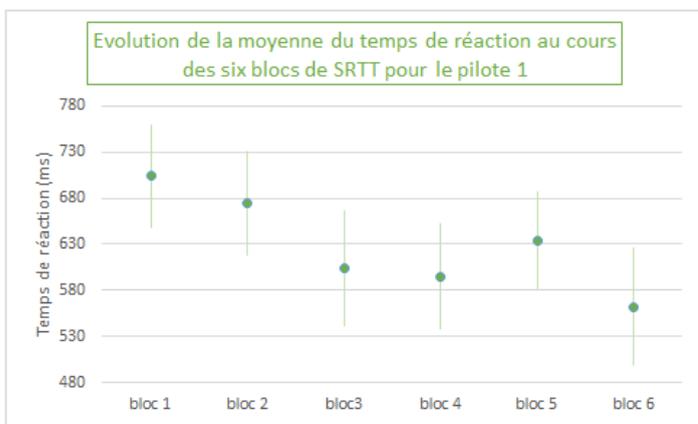
Contrairement à la passation standardisée du MABC 2, nous avons choisi de ne proposer qu'un essai pour chaque item et pour chaque main. Ces épreuves correspondent selon nous aux plus pertinentes pour notre étude d'autant plus qu'il existe une cohérence interne au sein du test ne nécessitant pas forcément de faire passer toutes les épreuves pour obtenir des scores avec déviations standards. Les items sont proposés aux participants avant la passation des tâches expérimentales à la suite du questionnaire de motricité perçue. Une fois de plus les sujets n'ont pas connaissance de leurs résultats.

RÉSULTATS

Pour le traitement de données, il a fallu d'une part réaliser la cotation des différentes évaluations du niveau moteur (questionnaire de latéralité, BHK, questionnaire du niveau moteur perçu et épreuves du MABC 2). D'autre part, le logiciel ayant servi à élaborer les tâches expérimentales nous a permis de recueillir les réponses des sujets avec une grande précision temporelle. Pour chaque épreuve nous avons ainsi pu obtenir les temps de réaction et calculer pour chaque bloc une moyenne de ces temps mesurés en millisecondes (ms) ainsi que les écarts-types.

1. Tâches expérimentales

1.1. Apprentissage de séquence



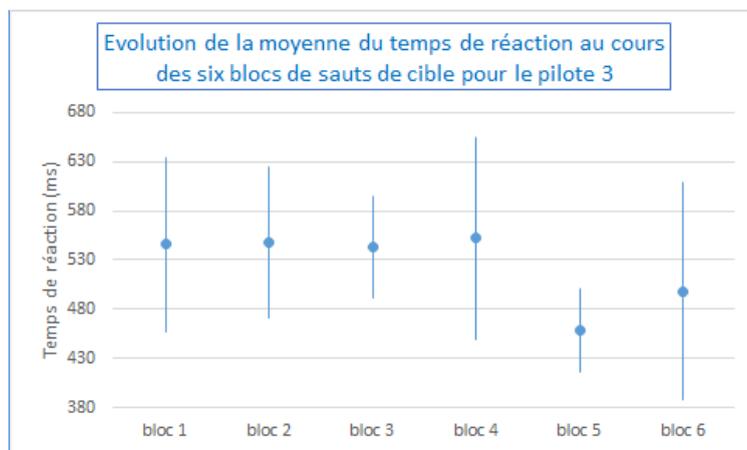
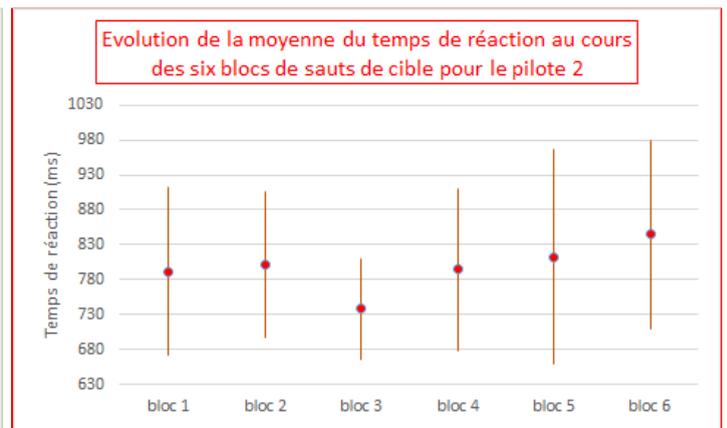
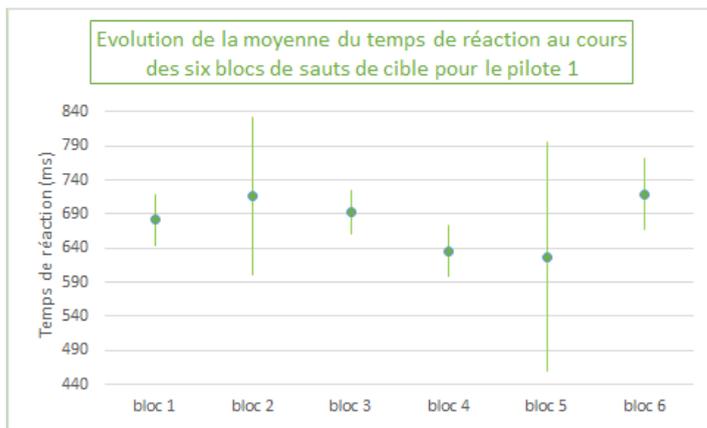
Figures 17, 18, 19 : Résultats des pilotes sur la tâche de SRTT

On observe que les 3 pilotes obtiennent des temps de réaction différents sur cette tâche. Toutefois, l'évolution de la moyenne des temps de réaction au cours des six blocs est relativement similaire. Hormis le pilote 2 qui indique une augmentation du temps de réaction sur le bloc 2, on observe une diminution progressive du temps de réaction moyen sur les blocs 1 à 4 puis une augmentation sur le bloc 5. Pour le 6e bloc, le temps de réaction moyen reprend sa tendance à diminuer et atteint même un résultat inférieur au bloc 4 pour les pilotes 1 et 2.

La progression entre le bloc 1 et le bloc 4 montre l'apprentissage général, tandis que la différence entre le bloc 4 et le bloc 5 montre l'apprentissage spécifique. Ces résultats correspondent à nos attentes et révèlent qu'il y a bien eu un apprentissage de la tâche chez nos trois pilotes. Au cours des essais, la séquence est donc progressivement mémorisée, induisant la diminution du temps de réaction due à une anticipation de la position du stimulus.

En ce qui concerne le ressenti des participants, ils relèvent tous que la tâche est longue et répétitive, suite à ces passations nous avons donc choisi de diminuer la longueur de la séquence à 8 éléments ainsi que le nombre de répétitions de la séquence par bloc (8 au lieu de 10).

1.2. Adaptation visuomotrice



Figures 20, 21, 22 : Résultats des pilotes sur la tâche de sauts de cible

Pour la tâche de saut de cible, on observe de nouveau des temps de réaction différents d'un pilote à l'autre. Néanmoins l'allure de l'évolution des moyennes de temps de réaction au cours des 6 blocs n'est pas celle que nous attendions. Les temps de réactions fluctuent d'un bloc à l'autre, il en est de même pour la variabilité au sein d'un même bloc (écarts-types).

Des adaptations ont dû être proposées pour que cette tâche reflète des effets d'apprentissage, cela sera détaillé dans la partie discussion.

2. Evaluation des habiletés motrices

2.1. Latéralité et évaluation des capacités graphiques

Pilotes	P 1	P 2	P 3
Questionnaire de latéralité	+ 78 => Droitier	+ 100 => Droitier	- 89 => Gaucher
BHK	14 pts : - 0,02 DS 729 mots : + 4 DS	12 pts : + 0,3 DS 545 mots : + 1, 5 DS	11 pts : + 0,5 DS 628 mots : + 2,7 DS

Le questionnaire de latéralité nous indique que parmi nos pilotes nous avons deux droitiers et un gaucher. L'évaluation de l'écriture révèle des capacités graphiques dans la norme avec une vitesse d'écriture très élevée chez les trois pilotes. C'est le pilote 3 qui a le meilleur rendement qualité/vitesse d'écriture. Ce test a permis de discriminer de légères différences dans les capacités graphiques chez nos trois participants.

2.2. Questionnaire d'évaluation du niveau moteur perçu

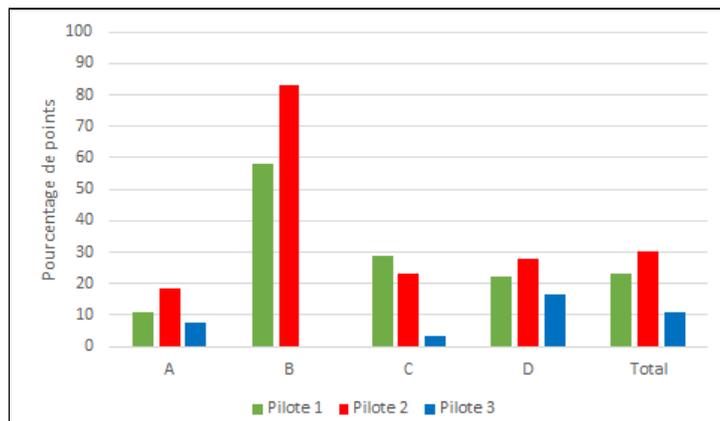


Figure 23 : Scores au questionnaire d'évaluation du niveau moteur perçu

Contrairement au pilote 3 qui a rempli le questionnaire avant que des modifications soient effectuées, les pilotes 1 et 2 ont répondu à la version finale avec 35 questions. Cela explique l'absence de point à la partie B pour le 3e pilote. Du fait de la différence entre les questionnaires, les points ont été convertis en pourcentage. De manière générale, les pilotes montrent au total de bons niveaux moteur perçus (< 35%). On observe néanmoins que le pilote 2 montre un niveau moteur perçu plus faible que les deux autres pilotes (difficultés durant l'enfance, faible pratique d'activités motrices de loisirs et difficultés actuelles). Ce pilote présentait déjà des difficultés motrices à l'enfance supérieures au deux autres pilotes (partie A) et désormais sa pratique d'activités motrices de loisirs est restreinte (partie B) et des difficultés motrices se sont maintenues à l'âge adulte (parties C et D). Ces résultats révèlent que le questionnaire est capable de discriminer des différences dans le niveau moteur perçu. Ils permettent aussi d'appuyer l'hypothèse que la présence de difficultés motrices à l'enfance se répercutent à l'âge adulte avec un plus faible niveau moteur perçu.

2.3. Epreuves du MABC 2

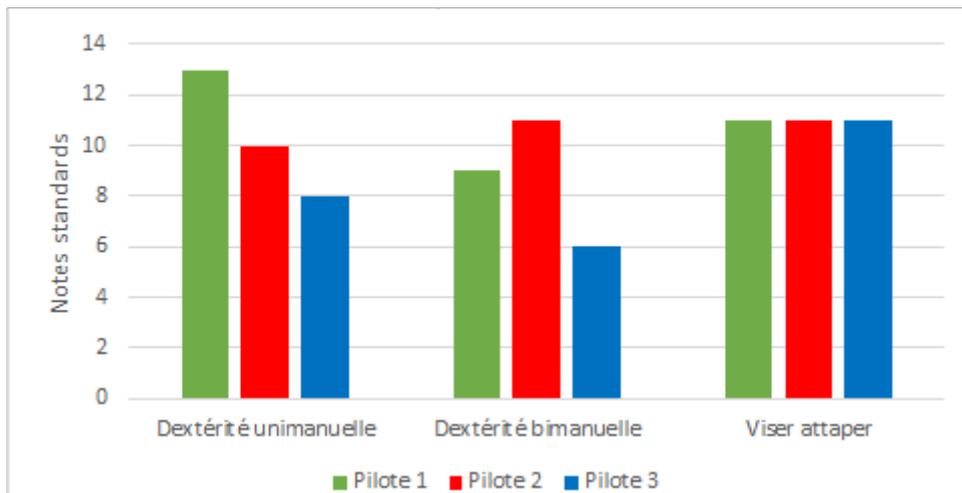


Figure 24 : Scores aux épreuves du MABC 2

On observe sur les histogrammes que les capacités motrices des pilotes se distinguent sur les items de dextérité unimanuelle et bimanuelle. En effet, l'item viser attraper a obtenu les mêmes scores pour nos trois pilotes (NS=11). Il est important de préciser que ce score est très haut et révèle que nos participants ont un bon niveau pour cette habileté motrice. Concernant la dextérité manuelle, c'est le pilote 3 qui obtient les notes les plus faibles autant en unimanuelle qu'en bimanuelle. Le pilote 1 obtient la meilleure performance en tâche unimanuelle tandis que le pilote 2 se démarque sur la tâche bimanuelle. Une fois encore, il a été possible grâce à ces épreuves de discriminer des différences dans les habiletés motrices.

DISCUSSION

Ce mémoire avait pour objectif de créer un test évaluant l'APPM et de tester sa sensibilité au niveau moteur, la question est donc la suivante : Existe-t-il une corrélation entre l'APPM et l'évaluation objective et subjective du niveau moteur ? Pour répondre à cette question, il a fallu réaliser une étude de faisabilité sur quelques participants pilotes afin d'élaborer des tâches permettant de mettre en évidence un effet d'apprentissage mais aussi pour sélectionner des habiletés motrices à évaluer. A notre stade, il n'est pas encore possible de répondre à la question principale car la passation de trois pilotes ne permet pas de réaliser une corrélation. En revanche, cette étude nous a permis au travers des trois passations pilotes de réaliser des ajustements sur notre projet.

Adaptations des tâches expérimentales

La première adaptation que nous avons réalisée concerne la présentation des stimuli. Ils étaient dans un premier temps basiques et de grande taille sur un fond noir. Les emplacements étaient disposés en croix. Nous avons ensuite fait le choix de disposer les emplacements en arc de cercle et de porter notre choix sur un stimulus plus petit représentant un perroquet coloré se déplaçant sur un fond plus attrayant (ciel bleu, Figure 13). La modification du positionnement des stimuli en arc de cercle était nécessaire pour la tâche d'adaptation visuo-motrice afin que la longueur et la direction des mouvements réalisés soient similaires quelle que soit la position initiale du stimulus. Le déplacement du stimulus étant toujours dans la même direction (vers le bas) pour que la correction du mouvement soit toujours un freinage. Pour que les deux tâches d'évaluation de l'APPM soient proches, il était nécessaire de conserver des caractéristiques communes, cela explique que le positionnement en arc de cercle ait été également appliqué sur la tâche d'apprentissage séquentiel.

Nous nous sommes rendues compte après la première passation, suite aux ressentis du pilote, que les tâches étaient trop longues et répétitives. Le test devant être relativement rapide d'utilisation pour les professionnels souhaitant tester l'APPM, nous avons donc décidé de réduire le nombre de stimuli par bloc pour les deux tâches. Il a fallu trouver un compromis entre une passation plus courte et un nombre d'unités d'apprentissage qui conserve des effets d'apprentissage tout en étant identique aux deux tâches. Ainsi nous nous sommes positionnées sur 8 unités d'apprentissage caractérisées dans la tâche de SRTT par une séquence répétée 8 fois pour chaque bloc et dans la tâche de saut de cible par une adaptation réalisée 8 fois pour chaque emplacement du stimulus et ceci pour chaque bloc. Pour réduire la longueur de la tâche il n'était pas possible de restreindre le nombre de blocs car cette structure nous était nécessaire pour mettre en avant un effet d'apprentissage. Le nombre de blocs correspond à ce qui se fait ordinairement dans les tâches expérimentales de laboratoire pour évaluer l'APPM.

Nous avons dû réfléchir aux conditions du bloc 5 dont l'enjeu est d'introduire un bloc ne présentant pas la séquence répétée afin de tester l'apprentissage spécifique de la séquence. En effet, cela permet de mettre en évidence un apprentissage spécifique et non un apprentissage général pouvant être simplement expliqué par une habitude à la tâche.

Les ajustements réalisés ont été progressifs et appliqués de manière similaire aux deux tâches : quand un changement a été décidé pour une tâche, il a été appliqué à l'autre tâche (configuration des stimuli, délai d'apparition, forme du stimulus). Pour la tâche de SRTT nous avons appliqué ce qu'il se fait traditionnellement c'est-à-dire la proposition des stimuli dans un ordre pseudo randomisé. Pour la tâche de saut de cible nous avons hésité entre la proposition d'un saut dans un sens différent et l'absence de saut. Notre choix s'est porté sur l'intégration d'un sens différent qui correspond à l'introduction de nouveaux repères auxquels il faut s'adapter.

La tâche de saut de cible nous a demandé beaucoup de réflexion et d'ajustements, en effet il s'agit d'une tâche peu courante dans la littérature ; il a donc fallu innover, tester et ré-ajuster progressivement. Cela explique la variabilité des résultats obtenus pour cette tâche chez nos trois pilotes. Nous avons par exemple choisi de positionner un point central sous l'arc de cercle où le sujet doit revenir entre chaque saut en cliquant dessus pour faire apparaître le stimulus suivant, cela permettant de calculer le temps de réaction exact correspondant au temps entre deux clics. Cependant, comme nous l'expliquions plus haut, le temps entre le clic sur le point central et le saut de cible était trop court lors de nos passations pouvant rendre le déplacement imperceptible par le sujet. Nous avons donc prévu de rallonger ce temps car ce défaut peut être à l'origine des résultats obtenus qui ne correspondent pas à nos attentes. Nous prévoyons également d'augmenter la taille du curseur jugé trop petit pour une bonne visualisation. Par ailleurs, la passation des deux premiers pilotes nous a fait ajouter une tâche de familiarisation au pointage afin de s'assurer que les participants aient une bonne prise en main du matériel.

Le test EVAL-APP vise à évaluer l'APPM aussi bien sur des enfants que des adultes ou des personnes âgées cependant, les individus doivent être en mesure d'utiliser l'ordinateur et de maîtriser l'usage de la souris. Par ailleurs, l'outil a été créé à l'aide du logiciel Open Access afin de le rendre disponible à tout professionnel souhaitant évaluer l'APPM mais ce logiciel impose des contraintes de programmation qui peuvent être contraignantes.

Nos résultats montrent que les tâches expérimentales sont des tâches ni trop simples ni trop complexes permettant d'observer des effets d'apprentissage, elles sont encore à ajuster mais semblent pertinentes pour constituer un test d'évaluation de l'APPM. Celui-ci pourra s'intégrer au sein d'un bilan psychomoteur une fois que nous aurons réalisé l'étalonnage et testé les critères psychométriques du test.

Plusieurs raisons soulignent la pertinences du test EVAL-APP :

- Les tâches nécessitent peu de matériel.
- Les consignes sont simples.
- L'exécution est facile et adaptée à une diversité de participants (enfants, adultes, personnes âgées) mais il faut retenir qu'il s'agit d'épreuves qui restent longues sans pour autant dépasser le temps de passation de certains autres tests psychomoteurs.
- Les mesures sont précises, directement enregistrées et traitées par l'ordinateur donc peu chronophage pour le clinicien.

Evaluation du niveau moteur

Pour évaluer les habiletés motrices nous avons cherché à déterminer la latéralité des pilotes, leurs capacités graphiques, leur dextérité unimanuelle et bimanuelle ainsi que leur maîtrise de balle. Il s'agit d'évaluations reconnues et validées en psychomotricité, nous avons dû réaliser une sélection pour éviter que les épreuves durent trop longtemps. Parallèlement, nous avons voulu connaître la perception qu'ont les pilotes de leur niveau moteur au travers d'un questionnaire de 35 questions. Entre les pilotes nous avons dû modifier le questionnaire qui était au départ très proche du questionnaire traduit ADC (Kirby et al., 2010). Nous avons alors fait le choix de nous inspirer du questionnaire initial en reprenant plusieurs questions traduites et en conservant la structure du questionnaire en plusieurs parties. Nous avons uniquement conservé les questions relatives à la motricité (et non les questions relatives aux fonctions cognitives ou psychoaffectives). Nous avons ajouté des éléments comme la pratique d'activités de loisirs (sport, activités manuelles, musique) ou encore l'utilisation d'instruments numériques (clavier, souris, touchpad...). C'est ainsi que nous sommes arrivés à la version finale du questionnaire d'évaluation du niveau moteur perçu évalué sur 105 points (Annexe 2).

Finalement, au travers de nos différentes évaluations, qu'elles soient objectives ou subjectives, nous avons pu évaluer des niveaux moteurs différents parmi nos trois pilotes. Même si le test du MABC 2 est étalonné jusqu'à 16 ans, les résultats des pilotes adultes indiquent que nos participants possèdent des variations de niveaux dans les habiletés motrices selon le domaine moteur évalué.

Une fois encore, le nombre restreint de pilotes ne permet pas de faire de réelles comparaisons mais nos résultats nous permettent de conserver nos épreuves motrices pour la suite du projet. Mais la perspective de corrélation entre le score d'APPM obtenu au test EVAL-APP et le score du MABC 2 semble donc réalisable sur la population adulte sans trouble.

Parallèle entre les tâches expérimentales et le niveau moteur

Il est encore trop tôt pour parler de l'existence d'un lien entre le niveau moteur et les scores d'APPM. On ne peut d'ailleurs même pas le constater à partir des résultats de nos trois pilotes. Il va falloir poursuivre notre projet en réalisant d'autres passations afin d'obtenir suffisamment de résultats pour établir des corrélations. Il faudra tout de même rester vigilant à certains biais, notamment aux effets de fatigue et aux interférences contextuelles liées à la variabilité de la pratique. Dans le test final, l'ordre de passation sera pré-déterminé avec la familiarisation avec le matériel, la tâche SRTT réalisée avant la tâche d'adaptation.

Les tâches sont apprenables et les évaluations des habiletés motrices parviennent à discriminer différents niveaux moteurs. Cependant, à ce stade nous ne pouvons pas savoir si les tâches expérimentales sont sensibles aux capacités motrices. La passation d'un grand nombre de participants le permettra (N = 110).

CONCLUSION

Ce mémoire m'a permis d'éclaircir et d'approfondir la compréhension des processus d'APPM. Plusieurs études ont cherché à investiguer l'implication des troubles neurodéveloppementaux et maladies neurodégénératives sur les altérations de l'apprentissage séquentiel et de l'adaptation perceptivo-motrice. Cependant ces processus sont encore peu explorés et les résultats obtenus divergent. Globalement, de nombreux troubles peuvent affecter l'APPM et impacter le développement des habiletés motrices, il est donc nécessaire en tant que psychomotricien de pouvoir l'évaluer.

A travers le projet EVAL-APP, nous avons la perspective de développer un test valide capable de mesurer de manière fiable et précise l'APPM dans diverses populations. Il s'agira par la suite d'étalonner ce test afin d'en donner l'accès aux psychomotriciens ayant besoin d'outils d'évaluation psychométriquement solides pour proposer des prises en charge adaptées à chaque individu. En effet, la possibilité d'évaluer les processus d'APPM va permettre d'optimiser la rééducation des habiletés motrices qui en découlent.

Pour l'instant, nous sommes encore au stade de conception du test en cherchant les bons ajustements à apporter afin qu'il soit valide mais aussi afin qu'il puisse s'intégrer au sein d'un bilan psychomoteur pour des patients à différents stades de développement. L'étude de faisabilité n'a pu se faire que sur trois pilotes pour le moment mais nos résultats sont déjà prometteurs autant pour la discrimination de différents niveaux moteurs que pour les liens obtenus entre nos tâches expérimentales et nos tâches écologiques. Nous comptons élargir notre étude sur un plus grand nombre de participants afin de pouvoir récolter de nombreuses données et établir des corrélations solides attestant la validité et la sensibilité de notre outil d'évaluation.

Le projet EVAL-APP fait l'objet d'un long travail nécessitant beaucoup de recherches et d'expérimentations mais l'enjeu est immense pour les psychomotriciens car il contribuera à pouvoir explorer le processus d'APPM en jeu dans les troubles psychomoteurs et leur rééducation. Les informations obtenues aideront le psychomotricien à orienter sa prise en charge dans le but d'apprendre ou de réapprendre à un patient des habiletés motrices afin de gagner en autonomie et d'être capable de s'adapter aux situations du quotidien.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adi-Japha, E., Fox, O., & Karni, A. (2011). Atypical acquisition and atypical expression of memory consolidation gains in a motor skill in young female adults with ADHD. *Research in Developmental Disabilities*, 32(3), 1011-1020. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.01.048>
- Albouy, G., Fogel, S., King, B. R., Laventure, S., Benali, H., Karni, A., Doyon, J. (2015). Maintaining vs. enhancing motor sequence memories : Respective roles of striatal and hippocampal systems. *NeuroImage*, 108, 423-434. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.12.049>
- American Psychiatric Association. (2015). *DSM-5 : Manuel Diagnostique et Statistique des Troubles Mentaux*.
- Anderson, J. R. (1987). Skill acquisition : Compilation of weak-method problem situations. *Psychological Review*, 94(2), 192-210. <https://doi.org/10.1037/0033-295x.94.2.192>
- Anderson, J. R. (2013). *The architecture of cognition*. Psychology Press.
- Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1968). Human Memory : A Proposed System and its Control Processes. *Psychology of Learning and Motivation*, 89-195. [https://doi.org/10.1016/s0079-7421\(08\)60422-3](https://doi.org/10.1016/s0079-7421(08)60422-3)
- Baddeley, A. (1992). Working memory. *Science*, 255(5044), 556-559. <https://doi.org/10.1126/science.1736359>
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working Memory. *Psychology of Learning and Motivation*, 47-89. [https://doi.org/10.1016/s0079-7421\(08\)60452-1](https://doi.org/10.1016/s0079-7421(08)60452-1)
- Bange, F. (2014). Introduction générale. Dans : François Bange éd., TDA/H - Trouble Déficit de l'Attention/Hyperactivité: En 57 notions (pp. XV-XVII). Paris: Dunod. <https://doi.org/10.3917/dunod.bange.2014.01.0000b>
- 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(5), 563-570. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.22.5.563>
- 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(5), 494-505. <https://doi.org/10.1080/87565641.2010.494750>
- Beaunieux, H., Desgranges, B., Lalevée, C., De La Sayette, V., Lechevalier, B., & Eustache, F. (1998). Preservation of Cognitive Procedural Memory in a Case of Korsakoff's Syndrome : Methodological and Theoretical Insights. *Perceptual and Motor Skills*, 86(3_suppl), 1267-1287. <https://doi.org/10.2466/pms.1998.86.3c.1267>
- 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(5), 521-539. <https://doi.org/10.1080/09658210500477766>
- Bernard, J. A., & Seidler, R. D. (2013). Relationships Between Regional Cerebellar Volume and Sensorimotor and Cognitive Function in Young and Older Adults. *The Cerebellum*, 12(5), 721-737. <https://doi.org/10.1007/s12311-013-0481-z>
- Berryhill, M. E., Mazuz, Y. S., & Olson, I. R. (2008). Serial reaction time performance following right parietal lobe damage. *Journal of Neuropsychology*, 2(2), 509-514. <https://doi.org/10.1348/174866407x269767>
- Blais, M., Amarantini, D., Albaret, J.-M., Chaix, Y., & Tallet, J. (2018). Atypical inter-hemispheric communication correlates with altered motor inhibition during learning of a new bimanual coordination pattern in developmental coordination disorder. *Developmental Science*, 21(3), e12563. <https://doi.org/10.1111/desc.12563>
- Bloch, A., Tamir, D., Vakil, E., & Zeilig, G. (2016). Specific Deficit in Implicit Motor Sequence Learning following Spinal Cord Injury. *PLOS ONE*, 11(6), e0158396. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158396>
- Boyd, L. A., Edwards, J. D., Siengsukon, C. S., Vidoni, E. D., Wessel, B. D., & Linsdell, M. A. (2009). Motor sequence chunking is impaired by basal ganglia stroke. *Neurobiology of Learning and Memory*, 92(1), 35-44. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2009.02.009>

- Brookes, R. L., Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (2007). Prisms throw light on developmental disorders. *Neuropsychologia*, *45*(8), 1921-1930. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.11.019>
- Brown, J., Aczel, B., Jiménez, L., Kaufman, S. B., & Grant, K. P. (2010). Intact implicit learning in autism spectrum conditions. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *63*(9), 1789-1812. <https://doi.org/10.1080/17470210903536910>
- Cahill, L., McGaugh, J. L., & Weinberger, N. M. (2001). The neurobiology of learning and memory : some reminders to remember. *Trends in Neurosciences*, *24*(10), 578-581. [https://doi.org/10.1016/s0166-2236\(00\)01885-3](https://doi.org/10.1016/s0166-2236(00)01885-3)
- Cameron, V. (2011). Targeting truancy. *Headteacher Update*, *2011*(6), 6. <https://doi.org/10.12968/htup.2011.29.6.84828>
- Canavan, A. G. M., Passingham, R. E., Marsden, C. D., Quinn, N., Wyke, M., & Polkey, C. E. (1989). Sequencing ability in Parkinsonians, patients with frontal lobe lesions and patients who have undergone unilateral temporal lobectomies. *Neuropsychologia*, *27*(6), 787-798. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(89\)90003-1](https://doi.org/10.1016/0028-3932(89)90003-1)
- Cantin, N., Polatajko, H. J., Thach, W. T., & Jaglal, S. (2007). Developmental coordination disorder : Exploration of a cerebellar hypothesis. *Human Movement Science*, *26*(3), 491-509. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2007.03.004>
- Carlsson, M., & Carlsson, A. (1990). Schizophrenia : A Subcortical Neurotransmitter Imbalance Syndrome ? *Schizophrenia Bulletin*, *16*(3), 425-432. <https://doi.org/10.1093/schbul/16.3.425>
- Channon, S., Pratt, P., & Robertson, M. M. (2003). Executive function, memory, and learning in Tourette's syndrome. *Neuropsychology*, *17*(2), 247-254. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.17.2.247>
- Chrobak, A. A., Siuda-Krzywicka, K., Siwek, G. P. ł., Arciszewska, A., Siwek, M., Starowicz-Filip, A., & Dudek, D. (2015). Implicit motor learning in bipolar disorder. *Journal of Affective Disorders*, *174*, 250-256. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2014.11.043>
- Clark, G. M., & Lum, J. A. G. (2017a). Procedural learning in Parkinson's disease, specific language impairment, dyslexia, schizophrenia, developmental coordination disorder, and autism spectrum disorders : A second-order meta-analysis. *Brain and Cognition*, *117*, 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2017.07.004>
- Clark, G. M., & Lum, J. A. G. (2017b). Procedural memory and speed of grammatical processing : Comparison between typically developing children and language impaired children. *Research in Developmental Disabilities*, *71*, 237-247. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2017.10.015>
- Cohen, N., & Squire, L. (1980). Preserved learning and retention of pattern-analyzing skill in amnesia : dissociation of knowing how and knowing that. *Science*, *210*(4466), 207-210. <https://doi.org/10.1126/science.7414331>
- Corraze, J. (2010). Psychomotricité : Histoire et validation d'un concept. *Regards sur la psychomotricité libanaise (2000-2010) : de la théorie à l'examen psychomoteur*.
- Coupé, P., Manjón, J. V., Lanuza, E., & Catheline, G. (2019). Lifespan Changes of the Human Brain In Alzheimer's Disease. *Scientific Reports*, *9*(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39809-8>
- Courchesne, E., Yeung-Courchesne, R., Hesselink, J. R., & Jernigan, T. L. (1988). Hypoplasia of Cerebellar Vermal Lobules VI and VII in Autism. *New England Journal of Medicine*, *318*(21), 1349-1354. <https://doi.org/10.1056/nejm198805263182102>
- Cousins, M., & Smyth, M. M. (2003). Developmental coordination impairments in adulthood. *Human Movement Science*, *22*(4-5), 433-459. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2003.09.003>
- De Beaumont, L., Tremblay, S., Poirier, J., Lassonde, M., & Theoret, H. (2012). Altered Bidirectional Plasticity and Reduced Implicit Motor Learning in Concussed Athletes. *Cerebral Cortex*, *22*(1), 112-121. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhr096>
- Debes, N., Jeppesen, S., Raghava, J. M., Groth, C., Rostrup, E., & Skov, L. (2014). Longitudinal Magnetic Resonance Imaging (MRI) Analysis of the Developmental Changes of Tourette Syndrome Reveal Reduced Diffusion in the Cortico-Striato-Thalamo-Cortical Pathways. *Journal of Child Neurology*, *30*(10), 1315-1326. <https://doi.org/10.1177/0883073814560629>

- De Meester, A., Barnett, L. M., Brian, A., Bowe, S. J., Jiménez-Díaz, J., Van Duyse, F., Irwin, J. M., Stodden, D. F., D'Hondt, E., Lenoir, M., & Haerens, L. (2020). The Relationship Between Actual and Perceived Motor Competence in Children, Adolescents and Young Adults: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, *50*(11), 2001–2049. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01336-2>
- Desmottes, L., Meulemans, T., & Maillart, C. (2016). Implicit Spoken Words and Motor Sequences Learning Are Impaired in Children with Specific Language Impairment. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *22*(5), 520-529. <https://doi.org/10.1017/s135561771600028x>
- Desmurget, M., Epstein, C. M., Turner, R. S., Prablanc, C., Alexander, G. E., & Grafton, S. T. (1999). Role of the posterior parietal cortex in updating reaching movements to a visual target. *Nature Neuroscience*, *2*(6), 563-567. <https://doi.org/10.1038/9219>
- Desmurget, M., Rossetti, Y., Jordan, M., Meckler, C., & Prablanc, C. (1997). Viewing the hand prior to movement improves accuracy of pointing performed toward the unseen contralateral hand. *Experimental Brain Research*, *115*(1), 180-186. <https://doi.org/10.1007/pl00005680>
- Dirnberger, G., Novak, J., & Nasel, C. (2013). Perceptual Sequence Learning Is More Severely Impaired than Motor Sequence Learning in Patients with Chronic Cerebellar Stroke. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *25*(12), 2207-2215. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00444
- Donchin, O., Kuper, M., Theysohn, N., Timmann, D., & Taig, E. (2012). Deficient Use of Visual Information in Estimating Hand Position in Cerebellar Patients. *Journal of Neuroscience*, *32*(46), 16274 -16284. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.1153-12.2012>
- Dovern, A., Fink, G. R., Timpert, D. C., Saliger, J., Karbe, H., Weiss, P. H., & Koch, I. (2016). Timing Matters ? Learning of Complex Spatiotemporal Sequences in Left-hemisphere Stroke Patients. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *28*(2), 223-236. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00890
- 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*(1), 61-75. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2008.11.012>
- Doyon, J., Gabbitov, E., Vahdat, S., Lungu, O., & Boutin, A. (2018). Current issues related to motor sequence learning in humans. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *20*, 89-97. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2017.11.012>
- Doyon, J., Gaudreau, D., Jr., R. L., Castonguay, M., Bédard, P. J., Bédard, F., & Bouchard, J.-P. (1997). Role of the Striatum, Cerebellum, and Frontal Lobes in the Learning of a Visuomotor Sequence. *Brain and Cognition*, *34*(2), 218-245. <https://doi.org/10.1006/brcg.1997.0899>
- 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*(4), 413-420. <https://doi.org/10.1051/medsci/2011274018>
- Doyon, J., Penhune, V., & Ungerleider, L. G. (2003). Distinct contribution of the cortico-striatal and cortico-cerebellar systems to motor skill learning. *Neuropsychologia*, *41*(3), 252-262. [https://doi.org/10.1016/s0028-3932\(02\)00158-6](https://doi.org/10.1016/s0028-3932(02)00158-6)
- Eustache, F., & Desgranges, B. (2008). MNESIS : Towards the Integration of Current Multisystem Models of Memory. *Neuropsychology Review*, *18*(1), 53-69. <https://doi.org/10.1007/s11065-008-9052-3>
- Exner, C., Boucsein, K., Degner, D., & Irle, E. (2006). State-dependent implicit learning deficit in schizophrenia : Evidence from 20-month follow-up. *Psychiatry Research*, *142*(1), 39-52. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2005.09.019>
- Exner, C., Lange, C., & Irle, E. (2009). Impaired implicit learning and reduced pre-supplementary motor cortex size in early-onset major depression with melancholic features. *Journal of Affective Disorders*, *119*(1-3), 156-162. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2009.03.015>
- Exner, C., Weniger, G., Schmidt-Samoa, C., & Irle, E. (2006). Reduced size of the pre-supplementary motor cortex and impaired motor sequence learning in first-episode schizophrenia. *Schizophrenia Research*, *84*(2-3), 386-396. <https://doi.org/10.1016/j.schres.2006.03.013>

- Ferraro, F. R., Balota, D. A., & Connor, L. T. (1993). Implicit Memory and the Formation of New Associations in Nondemented Parkinson's Disease Individuals and Individuals with Senile Dementia of the Alzheimer Type : A Serial Reaction Time (SRT) Investigation. *Brain and Cognition*, 21(2), 163-180. <https://doi.org/10.1006/brcg.1993.1013>
- Fitts, P. M. (1964). Perceptual-Motor Skill Learning : This chapter is based in part on research supported by the U. S. Air Force, Office of Scientific Research, under Contract No. AF 49 (638)-449. *Categories of Human Learning*, 243-285. <https://doi.org/10.1016/b978-1-4832-3145-7.50016-9>
- Foerde, K., Poldrack, R. A., Knowlton, B. J., Sabb, F. W., Bookheimer, S. Y., Bilder, R. M.,... Asarnow, R. F. (2008). « Selective corticostriatal dysfunction in schizophrenia : Examination of motor and cognitive skill learning » : Correction to Foerde et al. (2008). *Neuropsychology*, 22(2), 158. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.22.2.158>
- Foti, F., De Crescenzo, F., Vivanti, G., Menghini, D., & Vicari, S. (2014). Implicit learning in individuals with autism spectrum disorders : a meta-analysis. *Psychological Medicine*, 45(5), 897-910. <https://doi.org/10.1017/s0033291714001950>
- Franc, N., & Nesensohn, J. (2016). *La Dyspraxie En 100 Questions/Réponses (French Edition)*. Paris, France : Ellipses.
- 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(3), 264-271. <https://doi.org/10.1017/s1355617712001270>
- Gallahue, D. L. (1982). Assessing motor development in young children. *Studies in Educational Evaluation*, 8(3), 247-252. [https://doi.org/10.1016/0191-491x\(82\)90028-1](https://doi.org/10.1016/0191-491x(82)90028-1)
- Gheysen, F., Van Waelvelde, H., & Fias, W. (2011). Impaired visuo-motor sequence learning in Developmental Coordination Disorder. *Research in Developmental Disabilities*, 32(2), 749-756. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2010.11.005>
- Gomez Beldarrain, M., Gafman, J., Ruiz de Velasco, I., Pascual-Leone, A., & Garcia-Monco, J. (2002). Prefrontal lesions impair the implicit and explicit learning of sequences on visuomotor tasks. *Experimental Brain Research*, 142(4), 529-538. <https://doi.org/10.1007/s00221-001-0935-2>
- Gomez-Beldarrain, M. (1998). The cerebellar cognitive affective syndrome. *Brain*, 121(11), 2202-2205. <https://doi.org/10.1093/brain/121.11.2202>
- Gómez-Moya, R., Diaz, R., Vaca-Palomares, I., & Fernandez-Ruiz, J. (2019). Procedural and Strategic Visuomotor Learning Deficits in Children With Developmental Coordination Disorder. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 91(3), 386-393. <https://doi.org/10.1080/02701367.2019.1675852>
- Goodale, M. A., Pelisson, D., & Prablanc, C. (1986). Large adjustments in visually guided reaching do not depend on vision of the hand or perception of target displacement. *Nature*, 320(6064), 748-750. <https://doi.org/10.1038/320748a0>
- Gordon, B., & Stark, S. (2007). Procedural Learning of a Visual Sequence in Individuals With Autism. *Focus on Autism and Other Developmental Disabilities*, 22(1), 14-22. <https://doi.org/10.1177/10883576070220010201>
- Hedenius, M., Persson, J., Tremblay, A., Adi-Japha, E., Veríssimo, J., Dye, C. D.,... Ullman, M. T. (2011). Grammar predicts procedural learning and consolidation deficits in children with Specific Language Impairment. *Research in Developmental Disabilities*, 32(6), 2362-2375. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.07.026>
- Hirsh, R. (1974). The hippocampus and contextual retrieval of information from memory : A theory. *Behavioral Biology*, 12(4), 421-444. [https://doi.org/10.1016/s0091-6773\(74\)92231-7](https://doi.org/10.1016/s0091-6773(74)92231-7)
- Howard, J. H., 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(7), 1131-1144. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.10.015>
- Hsu, H. J., & Bishop, D. V. M. (2014). Sequence-specific procedural learning deficits in children with specific language impairment. *Developmental Science*, 17(3), 352-365. <https://doi.org/10.1111/desc.12125>

- Institut national de la santé et de la recherche médicale (France). Pôle Expertise collective & Institut national de la santé et de la recherche médicale (France). Pôle Expertise collective. (2019). *Trouble développemental de la coordination ou dyspraxie*. EDP sciences.
- Izadi-Najafabadi, S., Mirzakhani-Araghi, N., Miri-Lavasani, N., Nejati, V., & Pashazadeh-Azari, Z. (2015). Implicit and explicit motor learning : Application to children with Autism Spectrum Disorder (ASD). *Research in Developmental Disabilities, 47*, 284-296. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2015.09.020>
- Janacek, K., Fiser, J., & Nemeth, D. (2012). The best time to acquire new skills : age-related differences in implicit sequence learning across the human lifespan. *Developmental Science, 15*(4), 496-505. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2012.01150.x>
- Jarus, T., Ghanouni, P., Abel, R. L., Fomenoff, S. L., Lundberg, J., Davidson, S.,... Zwicker, J. G. (2015). Effect of internal versus external focus of attention on implicit motor learning in children with developmental coordination disorder. *Research in Developmental Disabilities, 37*, 119-126. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2014.11.009>
- Jongbloed-Pereboom, M., Nijhuis-van der Sanden, M. W. G., & Steenbergen, B. (2019). Explicit and implicit motor sequence learning in children and adults ; the role of age and visual working memory. *Human Movement Science, 64*, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2018.12.007>
- Kagerer, F. A., Bo, J., Contreras-Vidal, J. L., & Clark, J. E. (2004). Visuomotor Adaptation in Children with Developmental Coordination Disorder. *Motor Control, 8*(4), 450-460. <https://doi.org/10.1123/mcj.8.4.450>
- 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*(4-5), 622-633. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2006.06.003>
- Karatekin, C., White, T., & Bingham, C. (2009). Incidental and intentional sequence learning in youth-onset psychosis and attention-deficit/hyperactivity disorder (ADHD). *Neuropsychology, 23*(4), 445-459. <https://doi.org/10.1037/a0015562>
- Kathmann, N., Rupertseder, C., Hauke, W., & Zudig, M. (2005). Implicit Sequence Learning in Obsessive-Compulsive Disorder : Further Support for the Fronto-Striatal Dysfunction Model. *Biological Psychiatry, 58*(3), 239-244. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2005.03.045>
- 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*, 493-500. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00142>
- King, B. R., Kagerer, F. A., Haring, J. R., Contreras-Vidal, J. L., & Clark, J. E. (2011). Multisensory adaptation of spatial-to-motor transformations in children with developmental coordination disorder. *Experimental Brain Research, 212*(2), 257-265. <https://doi.org/10.1007/s00221-011-2722-z>
- Kirby, A., Edwards, L., & Sugden, D. (2011). Emerging adulthood in developmental co-ordination disorder : Parent and young adult perspectives. *Research in Developmental Disabilities, 32*(4), 1351-1360. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.01.041>
- Kirby, A., Edwards, L., Sugden, D., & Rosenblum, S. (2010). The development and standardization of the Adult Developmental Co-ordination Disorders/Dyspraxia Checklist (ADC). *Research in Developmental Disabilities, 31*(1), 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2009.08.010>
- Kirby, A., Sugden, D., & Edwards, L. (2011). Driving Behaviour in Young Adults with Developmental Co-ordination Disorder. *Journal of Adult Development, 18*(3), 122-129. <https://doi.org/10.1007/s10804-011-9120-4>
- Kleynen, M., Braun, S. M., Rasquin, S. M. C., Bleijlevens, M. H. C., Lexis, M. A. S., Halfens, J.,... Beurskens, A. J. (2015). Multidisciplinary Views on Applying Explicit and Implicit Motor Learning in Practice : An International Survey. *PLOS ONE, 10*(8), e0135522. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135522>
- Knopman, D. (1991). Long-term Retention of Implicitly Acquired Learning in Patients with Alzheimer's Disease. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology, 13*(6), 880-894. <https://doi.org/10.1080/01688639108405105>
- Knopman, D., & Nissen, M. J. (1991). Procedural learning is impaired in Huntington's disease : Evidence from the serial reaction time task. *Neuropsychologia, 29*(3), 245-254. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(91\)90085-m](https://doi.org/10.1016/0028-3932(91)90085-m)

- Knowlton, B. J., Ramus, S. J., & Squire, L. R. (1992). Intact Artificial Grammar Learning in Amnesia : Dissociation of Classification Learning and Explicit Memory for Specific Instances. *Psychological Science*, 3(3), 172-179. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1992.tb00021.x>
- Koch, I., Reverberi, C., & Rumiati, R. I. (2006). Learning hierarchically structured action sequences is unaffected by prefrontal-cortex lesion. *Experimental Brain Research*, 175(4), 667-675. <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0584-6>
- Laasonen, M., Väre, J., Oksanen-Hennah, H., Leppämäki, S., Tani, P., Harno, H.,... Cleeremans, A. (2014). Project DyAdd : Implicit learning in adult dyslexia and ADHD. *Annals of Dyslexia*, 64(1), 1-33. <https://doi.org/10.1007/s11881-013-0083-y>
- Laforce, R., & Doyon, J. (2001). Distinct Contribution of the Striatum and Cerebellum to Motor Learning. *Brain and Cognition*, 45(2), 189-211. <https://doi.org/10.1006/brcg.2000.1237>
- Lang, C. E., & Bastian, A. J. (2002). Cerebellar Damage Impairs Automaticity of a Recently Practiced Movement. *Journal of Neurophysiology*, 87(3), 1336-1347. <https://doi.org/10.1152/jn.00368.2001>
- Lê, M., Blais, M., Jucla, M., Chauveau, N., Maziero, S., Biotteau, M.,... Tallet, J. (2020). Procedural learning and retention of audio-verbal temporal sequence is altered in children with developmental coordination disorder but cortical thickness matters. *Developmental Science*, 24, 1. <https://doi.org/10.1111/desc.13009>
- Lejeune, C., Catale, C., Willems, S., & Meulemans, T. (2013). Intact procedural motor sequence learning in developmental coordination disorder. *Research in Developmental Disabilities*, 34(6), 1974-1981. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.03.017>
- Lukács, Á., & Kemény, F. (2014). Domain-general sequence learning deficit in specific language impairment. *Neuropsychology*, 28(3), 472-483. <https://doi.org/10.1037/neu0000052>
- Lum, J. A. G., & Bleses, D. (2012). Declarative and procedural memory in Danish speaking children with specific language impairment. *Journal of Communication Disorders*, 45(1), 46-58. <https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2011.09.001>
- Lum, J. A. G., Conti-Ramsden, G., Morgan, A. T., & Ullman, M. T. (2014). Procedural learning deficits in specific language impairment (SLI) : A meta-analysis of serial reaction time task performance. *Cortex*, 51, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2013.10.011>
- Lum, J. A. G., Conti-Ramsden, G., Page, D., & Ullman, M. T. (2012). Working, declarative and procedural memory in specific language impairment. *Cortex*, 48(9), 1138-1154. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2011.06.001>
- Lum, J. A. G., Gelgic, C., & Conti-Ramsden, G. (2010). Procedural and declarative memory in children with and without specific language impairment. *International Journal of Language & Communication Disorders*, 45(1), 96-107. <https://doi.org/10.3109/13682820902752285>
- Lum, J. A. G., 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(10), 3460-3476. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.07.017>
- Magallón, S., Crespo-Eguílaz, N., & Narbona, J. (2015). Procedural Learning in Children With Developmental Coordination, Reading, and Attention Disorders. *Journal of Child Neurology*, 30(11), 1496-1506. <https://doi.org/10.1177/0883073815572227>
- Marsh, R., Alexander, G., Packard, M., Zhu, H., & Peterson, B. (2005). Perceptual-motor skill learning in Gilles de la Tourette syndrome Evidence for multiple procedural learning and memory systems. *Neuropsychologia*, 43(10), 1456-1465. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2004.12.012>
- 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(7), 2009-2017. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.03.022>
- McLaughlin, S. C. (1967). Parametric adjustment in saccadic eye movements. *Perception & Psychophysics*, 2(8), 359-362. <https://doi.org/10.3758/bf03210071>

- McLeod, K. R., Langevin, L. M., Goodyear, B. G., & Dewey, D. (2014). Functional connectivity of neural motor networks is disrupted in children with developmental coordination disorder and attention-deficit/hyperactivity disorder. *NeuroImage : Clinical*, 4, 566-575. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2014.03.010>
- Menghini, D., Hagberg, G. E., Caltagirone, C., Petrosini, L., & Vicari, S. (2006). Implicit learning deficits in dyslexic adults : An fMRI study. *NeuroImage*, 33(4), 1218-1226. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.08.024>
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two : some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63(2), 81-97. <https://doi.org/10.1037/h0043158>
- Milner, B., Corkin, S., & Teuber, H.-L. (1968). Further analysis of the hippocampal amnesic syndrome : 14-year follow-up study of H.M. *Neuropsychologia*, 6(3), 215-234. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(68\)90021-3](https://doi.org/10.1016/0028-3932(68)90021-3)
- Mink, J. W. (2001). Basal ganglia dysfunction in Tourette's syndrome : a new hypothesis. *Pediatric Neurology*, 25(3), 190-198. [https://doi.org/10.1016/s0887-8994\(01\)00262-4](https://doi.org/10.1016/s0887-8994(01)00262-4)
- Molinari, M. (1997). Cerebellum and procedural learning : evidence from focal cerebellar lesions. *Brain*, 120(10), 1753-1762. <https://doi.org/10.1093/brain/120.10.1753>
- 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(7), 752-759. <https://doi.org/10.1017/s1355617700677020>
- Müller-Vahl, K. R., Kaufmann, J., Grosskreutz, J., Dengler, R., Emrich, H. M., & Peschel, T. (2009). Prefrontal and anterior cingulate cortex abnormalities in Tourette Syndrome : evidence from voxel-based morphometry and magnetization transfer imaging. *BMC Neuroscience*, 10(1), 47. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-10-47>
- Mutter, S. A., Howard, J. H., & Howard, D. V. (1994). Serial pattern learning after head injury. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 16(2), 271-288. <https://doi.org/10.1080/01688639408402638>
- Nemanich, S. T., & Earhart, G. M. (2015). How do age and nature of the motor task influence visuomotor adaptation ? *Gait & Posture*, 42(4), 564-568. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2015.09.001>
- Nemeth, D., Janacsek, K., Balogh, V., Londe, Z., Mingesz, R., Fazekas, M.,... Vetro, A. (2010). Learning in Autism : Implicitly Superb. *PLoS ONE*, 5(7), e11731. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0011731>
- Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (2007). Procedural learning difficulties : reuniting the developmental disorders ? *Trends in Neurosciences*, 30(4), 135-141. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2007.02.003>
- Nicolson, R. I., Fawcett, A. J., Brookes, R. L., & Needle, J. (2010). Procedural learning and dyslexia. *Dyslexia*, 16(3), 194-212. <https://doi.org/10.1002/dys.408>
- Nissen, M. J., & Bullemer, P. (1987). Attentional requirements of learning : Evidence from performance measures. *Cognitive Psychology*, 19(1), 1-32. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(87\)90002-8](https://doi.org/10.1016/0010-0285(87)90002-8)
- Obeid, R., Brooks, P. J., Powers, K. L., Gillespie-Lynch, K., & Lum, J. A. G. (2016). Statistical Learning in Specific Language Impairment and Autism Spectrum Disorder : A Meta-Analysis. *Frontiers in Psychology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01245>
- Ohta, M. (1987). Cognitive disorders of infantile autism : A study employing the WISC, spatial relationship conceptualization, and Gesture Imitations. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 17(1), 45-62. <https://doi.org/10.1007/bf01487259>
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97-113. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4)
- Orrell, A. J., Eves, F. F., Masters, R. S. W., & Macmahon, K. M. M. (2007). Implicit sequence learning processes after unilateral stroke. *Neuropsychological Rehabilitation*, 17(3), 335-354. <https://doi.org/10.1080/09602010600832788>
- Park, J., Miller, C. A., Rosenbaum, D. A., Sanjeevan, T., van Hell, J. G., Weiss, D. J., & Mainela-Arnold, E. (2018). Bilingualism and Procedural Learning in Typically Developing Children and Children With Language Impairment. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 61(3), 634-644. https://doi.org/10.1044/2017_jslhr-l-16-0409

- Pascual-Leone, A., Grafman, J., Clark, K., Stewart, M., Massaquoi, S., Lou, J.-S., & Hallett, M. (1993). Procedural learning in Parkinson's disease and cerebellar degeneration. *Annals of Neurology*, 34(4), 594-602. <https://doi.org/10.1002/ana.410340414>
- Pedersen, A., Küppers, K., Behnken, A., Kroker, K., Schöning, S., Baune, B. T.,... Suslow, T. (2009). Implicit and explicit procedural learning in patients recently remitted from severe major depression. *Psychiatry Research*, 169(1), 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2008.06.001>
- Pedersen, A., Siegmund, A., Ohrmann, P., Rist, F., Rothermundt, M., Suslow, T., & Arolt, V. (2008). Reduced implicit and explicit sequence learning in first-episode schizophrenia. *Neuropsychologia*, 46(1), 186-195. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.07.021>
- Rauch, S. L., Wright, C. I., Savage, C. R., Martis, B., McMullin, K. G., Wedig, M. M.,... Keuthen, N. J. (2007). Brain activation during implicit sequence learning in individuals with trichotillomania. *Psychiatry Research : Neuroimaging*, 154(3), 233-240. <https://doi.org/10.1016/j.pscychresns.2006.09.002>
- Reber, A. S. (1967). Implicit learning of artificial grammars. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 6(6), 855-863. [https://doi.org/10.1016/s0022-5371\(67\)80149-x](https://doi.org/10.1016/s0022-5371(67)80149-x)
- Reber, A. S. (1993). *Implicit learning and tacit knowledge : An essay on the cognitive unconscious*. Oxford : Oxford University Press.
- Reiss, J. P., Campbell, D. W., Leslie, W. D., Paulus, M. P., Ryner, L. N., Polimeni, J. O.,... Sareen, J. (2006). Deficit in schizophrenia to recruit the striatum in implicit learning : A functional magnetic resonance imaging investigation. *Schizophrenia Research*, 87(1-3), 127-137. <https://doi.org/10.1016/j.schres.2006.04.027>
- Rosenbaum, D. A., Carlson, R. A., & Gilmore, R. O. (2001). Acquisition of Intellectual and Perceptual-Motor Skills. *Annual Review of Psychology*, 52(1), 453-470. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.52.1.453>
- Ruitenbergh, M. F. L., Duthoo, W., Santens, P., Notebaert, W., & Abrahamse, E. L. (2015). Sequential movement skill in Parkinson's disease : A state-of-the-art. *Cortex*, 65, 102-112. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.01.005>
- Rumsey, J. M., & Hamburger, S. D. (1990). Neuropsychological divergence of high-level autism and severe dyslexia. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 20(2), 155-168. <https://doi.org/10.1007/bf02284715>
- Rüsseler, J., Gerth, I., & Münte, 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(5), 808-827. <https://doi.org/10.1080/13803390591001007>
- Sanes, J., Dimitrov, B., & Hallett, M. (1990). Motor learning in patients with cerebellar dysfunction. *Brain*, 113(1), 103-120. <https://doi.org/10.1093/brain/113.1.103>
- Schérer, H., Stip, E., Paquet, F., & Bédard, M.-A. (2003). Mild Procedural Learning Disturbances in Neuroleptic-Naive Patients With Schizophrenia. *The Journal of Neuropsychiatry and Clinical Neurosciences*, 15(1), 58-63. <https://doi.org/10.1176/jnp.15.1.58>
- Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82(4), 225-260. <https://doi.org/10.1037/h0076770>
- Schmitz, X., Bier, N., Joubert, S., Lejeune, C., Salmon, E., Rouleau, I., & Meulemans, T. (2014). The Benefits of Errorless Learning for Serial Reaction Time Performance in Alzheimer's Disease. *Journal of Alzheimer's Disease*, 39(2), 287-300. <https://doi.org/10.3233/jad-130887>
- Schmidt, R. A. (1993). *Apprentissage moteur et performance*. Paris : Vigot.
- Sengottuvel, K., & Rao, P. K. S. (2013). Aspects of grammar sensitive to procedural memory deficits in children with specific language impairment. *Research in Developmental Disabilities*, 34(10), 3317-3331. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.06.036>
- Sharer, E. A., Mostofsky, S. H., Pascual-Leone, A., & Oberman, L. M. (2015). Isolating Visual and Proprioceptive Components of Motor Sequence Learning in ASD. *Autism Research*, 9(5), 563-569. <https://doi.org/10.1002/aur.1537>

- Siegert, R. J., Weatherall, M., & Bell, E. M. (2008). Is implicit sequence learning impaired in schizophrenia ? A meta-analysis. *Brain and Cognition*, 67(3), 351-359. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2008.02.005>
- Sigman, M., & Ungerer, J. A. (1984). Attachment behaviors in autistic children. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 14(3), 231-244. <https://doi.org/10.1007/bf02409576>
- Soliveri, P. (1997). Learning manual pursuit tracking skills in patients with Parkinson's disease. *Brain*, 120(8), 1325-1337. <https://doi.org/10.1093/brain/120.8.1325>
- Sparaci, L., Formica, D., Lasorsa, F. R., Mazzone, L., Valeri, G., & Vicari, S. (2015). Untrivial Pursuit : Measuring Motor Procedures Learning in Children with Autism. *Autism Research*, 8(4), 398-411. <https://doi.org/10.1002/aur.1455>
- Spencer, R. M. C., & Ivry, R. B. (2009). Sequence Learning is Preserved in Individuals with Cerebellar Degeneration when the Movements are Directly Cued. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21(7), 1302-1310. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21102>
- Squire, L. R. (2004). Memory systems of the brain : A brief history and current perspective. *Neurobiology of Learning and Memory*, 82(3), 171-177. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2004.06.005>
- Squire, L. R., Knowlton, B., & Musen, G. (1993). The Structure and Organization of Memory. *Annual Review of Psychology*, 44(1), 453-495. <https://doi.org/10.1146/annurev.ps.44.020193.002321>
- Stevens, A., Peschk, I., & Schwarz, J. (2007). Implicit learning, executive function and hedonic activity in chronic polydrug abusers, currently abstinent polydrug abusers and controls. *Addiction*, 102(6), 937-946. <https://doi.org/10.1111/j.1360-0443.2007.01823.x>
- Stoodley, C. J., Harrison, E. P. D., & Stein, J. F. (2006). Implicit motor learning deficits in dyslexic adults. *Neuropsychologia*, 44(5), 795-798. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.07.009>
- Takács, Á., Kóbor, A., Chezan, J., Éltető, N., Tárnok, Z., Nemeth, D.,... Janacsek, K. (2018). Is procedural memory enhanced in Tourette syndrome ? Evidence from a sequence learning task. *Cortex*, 100, 84-94. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2017.08.037>
- Takács, Á., Shilon, Y., Janacsek, K., Kóbor, A., Tremblay, A., Németh, D. ő., & Ullman, M. T. (2017). Procedural learning in Tourette syndrome, ADHD, and comorbid Tourette-ADHD : Evidence from a probabilistic sequence learning task. *Brain and Cognition*, 117, 33-40. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2017.06.009>
- 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(8), 1339-1351. <https://doi.org/10.1162/0898929042304688>
- Tomblin, J. B., Mainela-Arnold, E., & Zhang, X. (2007). Procedural Learning in Adolescents With and Without Specific Language Impairment. *Language Learning and Development*, 3(4), 269-293. <https://doi.org/10.1080/15475440701377477>
- Travers, B. G., Klinger, M. R., Mussey, J. L., & Klinger, L. G. (2010). Motor-linked implicit learning in persons with autism spectrum disorders. *Autism Research*, n/a. <https://doi.org/10.1002/aur.123>
- Tulving, E. (1972). Episodic and Semantic Memory. *New York Academic Press*, 382-402. <https://doi.org/10.4135/9781446212967.n15>
- Tulving, E., Nyberg, L., Habib, R., Nilsson, L.-G., Kapur, S., Houle, S.,... McIntosh, A. R. (1995). Functional brain maps of retrieval mode and recovery of episodic information. *NeuroReport*, 7(1), 249-252. <https://doi.org/10.1097/00001756-199512000-00060>
- Valera, E. M., Faraone, S. V., Murray, K. E., & Seidman, L. J. (2007). Meta-Analysis of Structural Imaging Findings in Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder. *Biological Psychiatry*, 61(12), 1361-1369. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2006.06.011>
- Van Tilborg, I. A., & Hulstijn, W. (2010). Implicit Motor Learning in Patients with Parkinson's and Alzheimer's Disease : Differences in Learning Abilities ? *Motor Control*, 14(3), 344-361. <https://doi.org/10.1123/mcj.14.3.344>
- Vicari, S. (2005). Do children with developmental dyslexia have an implicit learning deficit ? *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 76(10), 1392-1397. <https://doi.org/10.1136/jnnp.2004.061093>

- Vicari, S., Marotta, L., Menghini, D., Molinari, M., & Petrosini, L. (2003). Implicit learning deficit in children with developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, 41(1), 108-114. [https://doi.org/10.1016/s0028-3932\(02\)00082-9](https://doi.org/10.1016/s0028-3932(02)00082-9)
- Waber, D. P., Marcus, D. J., Forbes, P. W., Bellinger, D. C., Weiler, M. D., Sorensen, L. G., & Curran, T. (2003). Motor sequence learning and reading ability : Is poor reading associated with sequencing deficits ? *Journal of Experimental Child Psychology*, 84(4), 338-354. [https://doi.org/10.1016/s0022-0965\(03\)00030-4](https://doi.org/10.1016/s0022-0965(03)00030-4)
- Wilson, P. H., Maruff, P., & Lum, J. (2003). Procedural learning in children with developmental coordination disorder. *Human Movement Science*, 22(4-5), 515-526. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2003.09.007>
- Wilson, P. H., Smits-Engelsman, B., Caeyenberghs, K., Steenbergen, B., Sugden, D., Clark, J.,... Blank, R. (2017). Cognitive and neuroimaging findings in developmental coordination disorder : new insights from a systematic review of recent research. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 59(11), 1117-1129. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13530>
- Witt, A. (2010) L'apprentissage implicite d'une grammaire artificielle chez l'enfant avec et sans retard mental : rôle des propriétés du matériel et influence des instructions. *Thèse de doctorat, Université de Bourgogne*
- Zwart, F. S., Vissers, C. T. W. M., Kessels, R. P. C., & Maes, J. H. R. (2017). Procedural learning across the lifespan : A systematic review with implications for atypical development. *Journal of Neuropsychology*, 13(2), 149-182. <https://doi.org/10.1111/jnp.12139>
- Zwart, F. S., Vissers, C. T. W. M., Kessels, R. P. C., & Maes, J. H. R. (2018). Implicit learning seems to come naturally for children with autism, but not for children with specific language impairment : Evidence from behavioral and ERP data. *Autism Research*, 11(7), 1050-1061. <https://doi.org/10.1002/aur.1954>
- Zwart, F. S., Vissers, C. T. W. M., van der Meij, R., Kessels, R. P. C., & Maes, J. H. R. (2017). Autism : Too eager to learn ? Event related potential findings of increased dependency on intentional learning in a serial reaction time task. *Autism Research*, 10(9), 1533-1543. <https://doi.org/10.1002/aur.1802>

ANNEXES

Annexe 1 : Outils d'évaluation objectifs et subjectifs des habiletés motrice

Annexe 2 : Questionnaire d'évaluation du niveau moteur perçu (inspiré de l'ADC, Kirby et al., 2010)

Nom du test		Références	Âge	Domaines évalués
LOMDS	L'échelle de développement moteur de Lincoln-Oseretsky	Oseretsky, Lincoln, Roge : adaptation française (1984)	6 - 14 ans	- Contrôle - Précision - Coordination globale neurologique - Vitesse des mouvements de poignets et de doigts - Equilibre - Coordination manuelle
CHARLOP-ATWELL	Echelle de coordination motrice	Albaret, Noack : adaptation française (1980)	3 - 6 ans	- Coordinations motrices générales
BOTMP-2	Bruininks-Oseretsky Test of Motor Proficiency version 2	Bruininks (2005)	4 - 21 ans	- Contrôle de la motricité fine - Coordination manuelle - Coordination du corps - Force et agilité
MABC-2	Batterie d'évaluation du mouvement pour les enfants, deuxième édition	Henderson et coll. (2007) adapté en France par Marquet Doléac et coll., (2016)	3 -16 ans	- Dextérité manuelle - Maîtrise de balles - Equilibre statique et dynamique
TGMD-2	Test of Gross Motor Development, 2nd edition	Ulrich, (2000) Soppelsa et Albaret, (2018)	4 - 10 ans 11 mois	- Locomotion - Contrôle d'objets
BHK	Échelle d'évaluation rapide de l'écriture chez l'enfant	Charles ; Soppelsa ; Albaret : adaptation française (2004)	CP - CM2	- Qualité d'écriture - Vitesse d'écriture
BHK ados	Échelle d'évaluation rapide de l'écriture chez l'adolescent	Soppelsa ; Albaret (2013)	6e - 3e	- Qualité d'écriture - Vitesse d'écriture

Nom du questionnaire		Références	Objets	Âge	Destinataires
AVQ	Questionnaire sur les Activités de la Vie Quotidienne	Geuze (2005)	Développement moteur	âge scolaire	Parents
DCDQ-FE	Questionnaire d'identification du trouble développemental de la coordination	Ray-Kaesler, Thommen, Martini, Jover, Gurtner, Bertrand (2019)	Habilités motrices	5-15 ans	Parents
MABC II-Q	Questionnaire de la Batterie d'Evaluation du Mouvement chez l'enfant	Henderson et coll. (2007) adapté en France par Marquet Doléac et coll., (2016)	Activités motrices quotidiennes	5 à 11 ans	Enseignants Parents Rééducateurs
PGES	Efficacité perçue et système de fixation d'objectifs	Missiuna et coll. (2004)	Participation (AVQ, école, loisirs)	5 à 9 ans	Enfant, soignants, éducateur
ADC	Le trouble de la coordination du développement / la dyspraxie chez l'adulte. Liste de contrôle (ADC)	Kirby et al. (2010)	Différents domaines de la vie quotidienne impliquant des habiletés motrices	Adolescents, Adultes	Auto-évaluation

Annexe 1 : Outils d'évaluation objectifs et subjectifs des habiletés motrices

Questionnaire d'évaluation du niveau moteur perçu (inspiré de l'ADC, Kirby et al., 2010)

Code :

Date :

Pour chacun des items suivants pouvez-vous nous dire à quelle fréquence vous rencontrez, ou avez dans le passé rencontré, ces difficultés ?

Partie A - Quand vous étiez enfant, aviez-vous des difficultés :	Jamais	Parfois	Souvent	Toujours	NA
Dans l'habillement, pour nouer vos lacets, fermer les boutons et utiliser les fermetures éclair ?	<input type="checkbox"/>				
Pour manger sans vous salir ?	<input type="checkbox"/>				
Pour apprendre à faire du vélo par rapport à vos pairs ?	<input type="checkbox"/>				
Pour jouer à des jeux d'équipe, tels que le football, le volleyball, attraper ou lancer des balles avec précision ?	<input type="checkbox"/>				
Pour écrire soigneusement ?	<input type="checkbox"/>				
Pour écrire aussi vite que vos pairs ?	<input type="checkbox"/>				
Dans la gestion de votre environnement comme se heurter à des objets ou à des personnes, trébucher sur des choses plus que les autres personnes ?	<input type="checkbox"/>				
Pour jouer d'un instrument de musique (violon, flûte à bec) ?	<input type="checkbox"/>				
Est-ce que les autres disaient que vous étiez « maladroit-e » ?	<input type="checkbox"/>				

Partie B : Habituellement	Jamais	Parfois	Souvent	Toujours	Décrivez ou commentez (sans vous identifier)
A quelle fréquence jouez-vous aux jeux vidéo ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Quel genre de jeux ? Avec quoi (manette, joystick, clavier, souris, téléphone) ?
Pratiquez-vous une activité sportive ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Si oui, veuillez préciser :
Jouez-vous d'un instrument ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Si oui, veuillez préciser :
Pratiquez-vous une activité manuelle créative ou de loisirs ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Si oui, veuillez préciser :

Partie C - Actuellement, avez-vous des difficultés pour les items suivants :	Jamais	Parfois	Souvent	Toujours	Décrivez ou commentez (si nécessaire)
Les soins personnels, comme le rasage ou le maquillage.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Manger avec un couteau et une fourchette / une cuillère.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Les loisirs qui nécessitent de bonnes coordinations motrices.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Écrire proprement lorsque vous devez écrire rapidement.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Écrire aussi vite que vos pairs.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Lire votre propre écriture.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Copier les choses sans erreur.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Utiliser le clavier.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Nombre de doigts pour la frappe :
Utiliser la souris ou le touchpad.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Bricoler	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Partie D : Habituellement	Jamais	Parfois	Souvent	Toujours	Décrivez ou commentez
Avez-vous des difficultés à rester assis / paraissez-vous agité-e?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<i>Si oui, après combien de temps ?</i>
Diriez-vous que vous vous cognez ou que vous renversez / cassez des choses ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Évitez-vous les passe-temps qui nécessitent de bonnes coordinations ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Évitez-vous les jeux / sports d'équipe?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Évitez vous de danser ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Avez-vous des difficultés à effectuer deux choses en même temps (ex : conduire et écouter) ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Avez-vous eu des difficultés pour apprendre à conduire?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<i>Si vous ne conduisez pas, expliquez pourquoi vous avez choisi de ne pas conduire ? Sinon, combien de leçons avez-vous suivies ? Pendant combien de temps ?</i>
Si vous êtes conducteur, avez-vous des difficultés à garer une voiture ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Avez-vous des difficultés pour estimer les distances (ex : stationnement, passage d'objets) ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Avez-vous des difficultés à plier vos vêtements pour les ranger proprement ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Pensez-vous que vous perdez votre attention dans certaines situations ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Les autres trouvent-ils votre écriture difficile à lire ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Annexe 2 : Questionnaire d'évaluation du niveau moteur perçu (inspiré de l'ADC, Kirby et al., 2010)

RÉSUMÉ

L'apprentissage procédural perceptivo-moteur (APPM) est le socle sur lequel les habiletés motrices se développent. Le psychomotricien est capable d'évaluer le niveau moteur d'un individu à l'aide de différents outils de mesure mais rien n'existe encore pour évaluer les processus d'APPM. Ce mémoire porte sur l'élaboration d'un outil d'évaluation de l'APPM et fait suite aux revues systématiques de littérature faisant l'objet de précédents mémoires étudiant l'impact de multiples pathologies sur les processus d'APPM au cours du développement.

Le projet EVAL-APP a pour objectif de créer un outil d'évaluation de l'APPM et tester sa validité et sa sensibilité. Ce mémoire se concentre sur l'étude de la sensibilité de l'outil en se basant sur les résultats des évaluations expérimentales de l'APPM et des mesures du niveau moteur.

Ici, sera décrit la création du protocole et son application lors de l'étude pilote. Cette application initiale, à petite échelle, a permis d'adapter la conception du protocole par des ajustements progressifs et d'établir ainsi sa faisabilité.

Mots clés : APPM, , habiletés motrices, SRTT, adaptation perceptivo-motrice

Perceptual-motor procedural learning (PMPL) is the foundation on which motor skills are developed. The psychomotrician is able to assess the motor level of an individual using different measurement tools but nothing yet exists to assess the PMPL processes. This dissertation focuses on the development of a PMPL assessment tool and follows systematic literature reviews in previous dissertations investigating the impact of multiple pathologies on PMPL processes during development.

The EVAL-APP project aims to create an assessment tool for the PMPL and to test its validity and sensitivity. This dissertation focuses on the study of the sensitivity of the tool based on the results of experimental assessments of the PMPL and motor level measurements.

Here, the creation of the protocol and its application in the pilot study will be described. This initial, small-scale application allowed the design of the protocol to be adapted through incremental adjustments and thus established its feasibility.

Key words: PMPL, motor skills, SRTT, perceptual-motor adaptation