



Université
Fédérale

Toulouse
Midi-Pyrénées

Faculté de Médecine Toulouse
Rangueil

Institut de Formation en
Psychomotricité



Effets des troubles neurodéveloppementaux de l'enfant sur l'apprentissage moteur : revue systématique de la littérature



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

Ysia CLAUSSES

Sous la direction d'Elodie Martin et Jessica Tallet

Juin 2020

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
PARTIE 1 : CADRE THEORIQUE	1
Apprentissage et mémoire	3
Apprentissage	3
Définition	3
Distinctions au sein de l'apprentissage	5
Mesure et Courbe d'apprentissage	5
Apprentissage implicite et explicite	6
Apprentissage massé, distribué	7
Mémoires	7
Définition	7
Memory NEo- Structural Inter-Systemic model (MNESIS)	10
Différents apprentissages procéduraux	12
Apprentissage procédural cognitif	12
Apprentissage procédural perceptivo-verbal	13
Apprentissage procédural perceptivo-moteur	13
Phases de l'apprentissage procédural	16
Psychomotricité et apprentissage procédural perceptivo-moteur	17
L'apprentissage procédural perceptivo-moteur	17
Modèle de Doyon	17
Distinction entre apprentissage procédural séquentiel et apprentissage procédural d'adaptation visuo-motrice	20
Adaptation	20
visuo-motrice	20
Séquences motrices	21
Modèle Doyon 2017 de l'apprentissage de séquences motrices.....	21
Développement typique de l'apprentissage procédural	23

Modèle de l'invariance développementale	24
Modèles de changement en fonction de l'âge	25
Modèle avec pic de performance chez les jeunes adultes	25
Modèle avec déclin des performances après l'enfance	26
Conclusion sur le développement de l'apprentissage procédural	27
Théorie du déficit d'apprentissage procédural dans les troubles neurodéveloppementaux.....	28
Modèle de Nicolson et Fawcett 2007	29
Remise en question de la théorie du déficit procédural dans les troubles neurodéveloppementaux	31
Problématique	32
PARTIE 2 : REVUE SYSTEMATIQUE DE LA LITTERATURE	34
Méthode	34
Principes d'une revue systématique de littérature	34
Etape 1 : Mots clés	34
Etape 2 : Identification	35
Etape 3 : Processus de sélection	35
Etape 4 : Admissibilité	36
Etape 5 : Inclus.....	37
Résultats - Discussion	38
Apprentissage procédural et Syndrome de Gilles de la Tourette	49
Rappel sur la pathologie	49
Résultats	49
Discussion	50
Apprentissage procédural et Trouble Déficitaire de l'Attention / Hyperactivité	50
Rappel sur la pathologie	50
Résultats	51
Discussion	51
Apprentissage procédural et Trouble du Spectre de l'Autisme	52
Rappel sur la pathologie	52
Résultats	52

Discussion	53
Apprentissage procédural et Trouble Développementale de la Coordination	54
Rappel sur la pathologie	54
Résultats	54
Discussion	55
Apprentissage procédural et Dyslexie	56
Rappel sur la pathologie	56
Résultats	56
Discussion	
57 Apprentissage procédural et Trouble Spécifique du Langage.....	
59 Rappel sur la pathologie	
59	
Résultats	59
Discussion	61
Conclusion - Perspectives	64
Déficit d'apprentissage procédural dans les troubles neurodéveloppementaux	64
Les facteurs d'influence du déficit	65
L'outil d'évaluation de l'apprentissage procédural séquentiel	65
Bibliographie	69
Résumé	81

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure 1 : Le trépied symptomatologique et la pluralité étiologique des troubles psychomoteurs (d'après Corraze, 2010)	1
Figure 2 : Différence comportementale initiale des blobs en fonction de l'apprentissage d'habituation ou de son absence avec courbe d'extinction de l'apprentissage (Vogel & Dussutour, 2016)	4
Figure 3 : Courbe d'apprentissage montrant une diminution du score d'erreur avec l'augmentation des périodes d'entraînement (dans Trussel 1965)	5
Figure 4 : Modèle de la distinction en mémoire à long terme de la mémoire déclarative et la mémoire non déclarative Squire 2004	9
Figure 5 : Circuits cérébraux de la mémoire déclarative et de la mémoire procédurale ou non déclarative (vetopsy.fr)	10
Figure 6 : Modèle MNESIS des interrelations entre les différents systèmes de mémoire (dans Eustache et al, 2016)	11
Figure 7 : Procédure d'une tâche de SRTT ou FTT (Image personnelle).....	15
Figure 8 : Exemple de séquence proposée lors d'une tâche de FOT (Image personnelle)	15
Figure 9 : Procédure d'une tâche d'ASRT (image personnelle)	16
Figure 10 : Modèle neuroanatomique de l'apprentissage de séquences motrices et d'adaptation motrice évoluant en fonction des phases d'apprentissage (traduit de Doyon 2003)	19
Figure 11 : Modèle de l'apprentissage procédural de séquence (traduit de Doyon 2017)	22
Figure 12 : 3 modèles du développement de l'apprentissage procédural selon l'étude de Zwart et coll. (2018)	24
Figure 13 : Temps de réaction moyen en fonction du groupe (6 ans, 10 ans, adultes), du bloc (1, 2, 3, 4, 5) et du type de séquence (répétée ou aléatoire) (Meulemans et al., 1998)	25
Figure 14 : Changement avec l'avancé en âge de la prédominance du model-basé sur l'apprentissage ou du modèle libre d'apprentissage (traduit de Janacsek et al., 2012)	27
Figure 15 : Modèle de réunification des troubles neurodéveloppementaux selon un système d'atteinte de circuits neuronaux par Nicolson et Fawcett 2007 (traduit)	30
Figure 16 : Organigramme PRISMA montrant le processus d'identification des articles pour la revue systématique de littérature	37
Tableau 1 : Répartition du nombre d'articles sélectionnés par pathologie	38
Tableau 2 : Tableau récapitulatif des résultats sur le SGT	40
Tableau 3 : Tableau récapitulatif des résultats sur le TDA/H	41
Tableau 4 : Tableau récapitulatif des résultats sur le TSA	42
Tableau 5 : Tableau récapitulatif des résultats sur le TDC	43
Tableau 6 : Tableau récapitulatif des résultats sur la dyslexie	44
Tableau 7 : Tableau récapitulatif des résultats sur le TSL.....	46

INTRODUCTION

Le psychomotricien est par définition le spécialiste des troubles psychomoteurs. D'après Corraze (Corraze, 2010) les troubles psychomoteurs sont des troubles perceptivo-moteurs affectant les fonctions d'exploration (aspects perceptifs), d'action (sur le milieu physique) et de communication (aspects non verbaux essentiellement). Ils se manifestent par de signes neurologiques doux suggérant l'existence d'un dysfonctionnement cérébral à minima et sont associés à un complexe psychopathologique comportant des facteurs émotionnels. L'étiologie de ces troubles peut être multiple et nécessite l'analyse attentive des dimensions biologiques (ou organiques), écologiques (ou environnementales) et intentionnelles (ou téléologiques) (Figure 1).

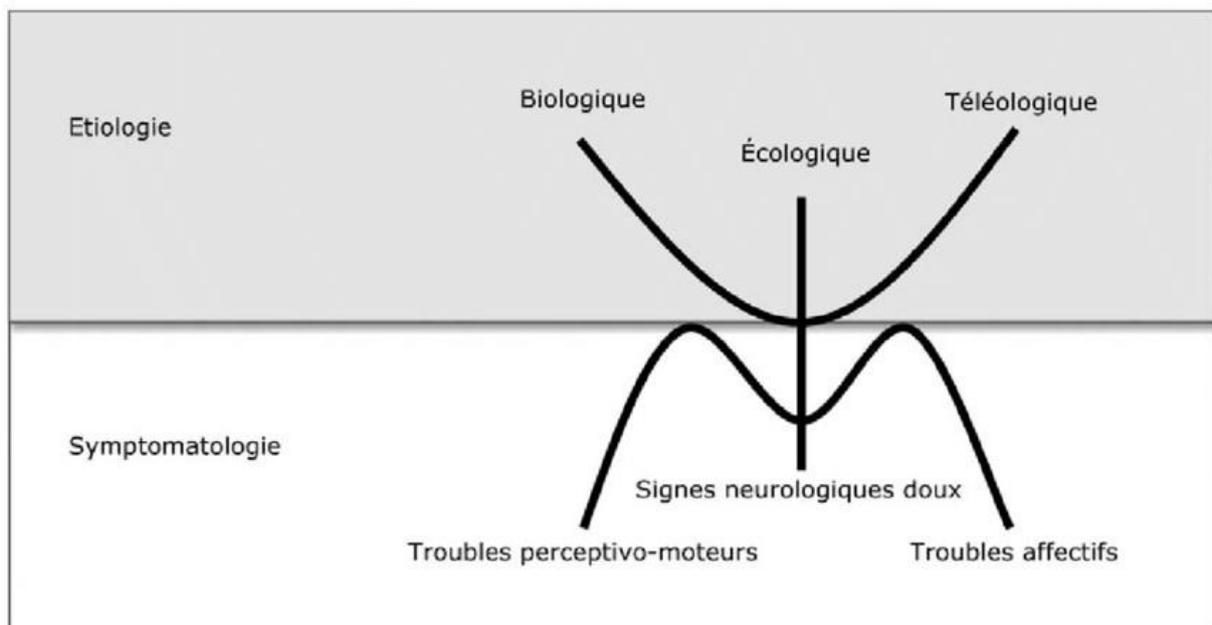


Figure 1 : Le trépied symptomatologique et la pluralité étiologique des troubles psychomoteurs (d'après Corraze, 2010)

La rééducation psychomotrice met en jeu l'apprentissage procédural, c'est-à-dire l'acquisition de savoir-faire grâce à la pratique répétée (Schmidt, 1988). L'apprentissage procédural possède une composante perceptivo-motrice importante dans le sens où il est nécessaire de prendre en compte les caractéristiques de

l'environnement (aspects perceptifs) pendant le déroulement de l'action (aspects moteurs) pour que le comportement final soit adapté et efficient. L'altération de l'apprentissage procédural constitue donc une entrave à l'efficacité de la rééducation psychomotrice et ce signe doit être détecté chez les individus présentant des troubles psychomoteurs, quelles qu'en soient leurs étiologies et la part des facteurs biologiques, écologiques et téléologiques. Il semble donc important de pouvoir quantifier cette atteinte, en tant que psychomotricien, pour pouvoir adapter notre prise en charge en vue de réduire ou compenser le trouble perceptivo-moteur.

C'est dans cette optique de compréhension et quantification de l'altération de l'apprentissage procédural dans les troubles psychomoteurs qu'est né le projet de ce mémoire. Nous avons donc réalisé une analyse systématique de la littérature sur les capacités d'apprentissage procédural des enfants atteints de troubles neurodéveloppementaux et, à partir des résultats obtenus, précisé l'intérêt de construire un outil d'évaluation de l'apprentissage procédural utilisable par l'ensemble des psychomotriciens afin de tester les capacités d'apprentissage et de les guider dans leur prise en charge.

PARTIE 1 : CADRE THEORIQUE

APPRENTISSAGE ET MEMOIRE

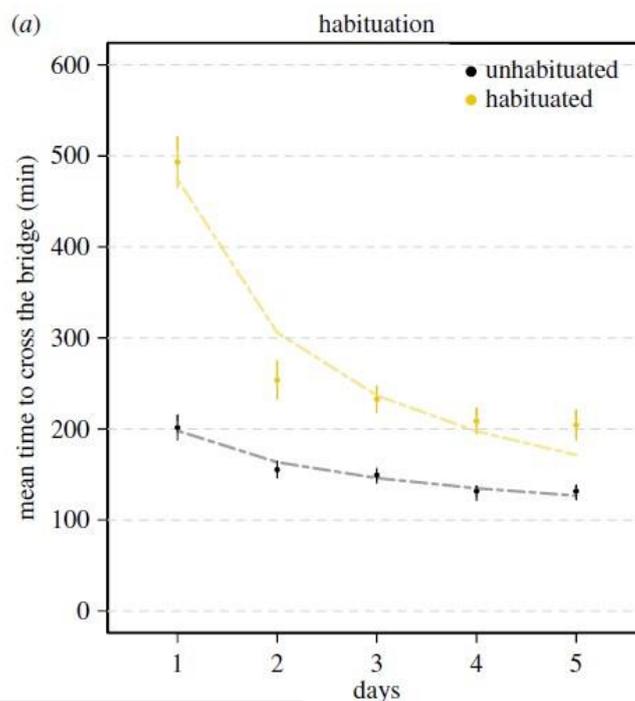
L'apprentissage et la mémoire sont deux processus étroitement liés, indispensables l'un à l'autre. L'apprentissage permet l'acquisition de certains savoirs et savoir-faire tandis que la mémoire encode ces acquisitions dans notre système nerveux, les stocke et permet leur réutilisation par la récupération. Sans mémoire, un apprentissage est éphémère et nous serions condamnés à réapprendre chaque jour la même chose sans possibilité d'évolution, d'amélioration. Sans apprentissage, la mémoire n'a pas d'utilité puisqu'elle n'a alors plus rien à stocker ni à récupérer.

APPRENTISSAGE

DEFINITION

« L'apprentissage, c'est le changement produit dans le comportement ou le potentiel de comportement d'un sujet dans une situation donnée par la suite d'expériences répétées du sujet dans cette situation, à condition que ce changement de comportement ne puisse s'expliquer par des tendances innés du sujet, la maturation ou des états temporaires (ex. fatigue, ivresse, moments d'exaltation » (Bower & Hilgard, 1981). L'apprentissage repose, sur la plasticité cérébrale structurelle et fonctionnelle et, au niveau cellulaire, sur la capacité des neurones à modifier de façon durable l'efficacité de leur transmission synaptique. L'apprentissage n'est donc pas un fait strictement humain, de nombreuses expériences ont prouvé que bien des espèces sont capables d'apprentissage. Récemment, en 2016, des chercheurs toulousains ont même montré qu'une organisme unicellulaire, le blob ou *Physarum polycephalum*, est capable d'une certaine forme d'apprentissage, malgré l'absence de système nerveux (Vogel & Dussutour, 2016). Néanmoins il convient de bien distinguer l'apprentissage dont est capable le blob de celui dont nous sommes capables en tant qu'être humains pourvus d'un système nerveux complexe. L'apprentissage réalisé par le blob est une habituation ce qui est considéré comme un apprentissage très rudimentaire (Figure 2). Il s'agit de la diminution de la réponse

suite à la répétition d'un stimulus de même valence présenté de façon permanente et sans renforcement.



Les blocs habitués à une substance repoussante (courbe jaune) présentent une aversion à traverser le pont mesuré par le temps qu'ils mettent pour le traverser, contrairement aux blocs non habitués (courbe noire). Cette aversion tend à diminuer avec le temps (extinction)

Figure 2 : Différence comportementale initiale des blocs en fonction de l'apprentissage d'habituation ou de son absence avec courbe d'extinction de l'apprentissage (Vogel & Dussutour, 2016)

C'est Eric Kandel, prix Nobel de médecine en 2000, qui a établi les bases cellulaires et moléculaires de cet apprentissage par le biais d'une approche réductionniste c'est-à-dire expliquer le complexe (notre système nerveux) par le simple (le système nerveux d'une aplysie, un mollusque gastéropode). Il a montré que le réflexe de retrait de la branchie et du siphon lors de l'effleurage de celui-ci chez l'aplysie diminuait après répétition de cet effleurage et était corrélé au niveau cellulaire à une dépression synaptique (diminution de la libération de neurotransmetteurs entre le neurone sensoriel et le motoneurone dans la fente synaptique et diminution du nombre de zones actives) entraînant une diminution de la réponse du motoneurone. Ainsi l'apprentissage repose sur des mécanismes cellulaires et moléculaires existant déjà dans des systèmes nerveux moins complexes que le nôtre.

Il existe aussi la possibilité de sensibilisation, c'est-à-dire l'augmentation de la réponse motrice à un stimulus donné qui, auparavant, ne déclenchait aucune réponse particulière (Groves & Thompson, 1970).

DISTINCTIONS AU SEIN DE L' APPRENTISSAGE

Au-delà de l'habituation et de la sensibilisation, l'apprentissage peut revêtir des formes plus complexes.

Nous pouvons distinguer deux grands types d'apprentissage : l'apprentissage déclaratif et l'apprentissage procédural (Eustache et al., 2016; Eustache & Desgranges, 2008; Squire, 2004) . L'apprentissage déclaratif est un apprentissage explicite et verbalisable qui peut se faire de façon instantanée (Anderson, 1982; Tulving, 1972). L'apprentissage procédural correspond quant à lui à l'acquisition progressive de nouvelles compétences ou habiletés grâce à l'entraînement répété. Il est plus difficilement verbalisable et souvent (mais pas toujours) implicite c'est-à-dire qu'il ne nécessite pas d'effort conscient (Meulemans et al., 1998). Ces deux types d'apprentissage sont mesurables de façon indirecte.

MESURE ET COURBE D'APPRENTISSAGE

Quel que soit l'apprentissage, celui-ci se mesure ou plutôt s'infère de façon indirecte par le biais du changement adaptatif et durable dans la performance à une tâche. Pour attester de ce changement, il est nécessaire de procéder à une mesure des performances au cours des essais d'apprentissage. Ces différentes mesures vont permettre de tracer une courbe d'apprentissage où la performance (en unité de temps, de quantité, en nombre d'erreurs...) est donnée en fonction des essais de pratique (Figure 3).

Décroissance des erreurs

Trussel (1965)

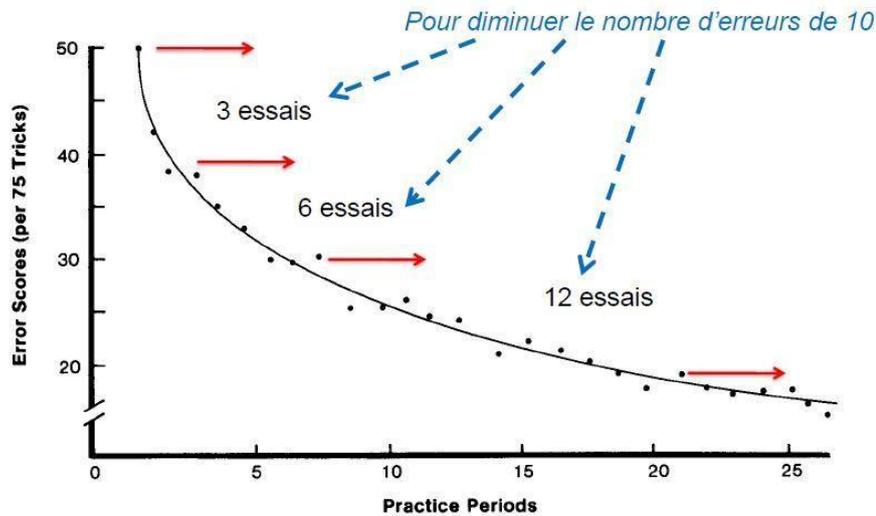


Figure 3 : Courbe d'apprentissage montrant une diminution du score d'erreur avec l'augmentation des périodes d'entraînement (dans Trussel 1965)

La performance est une mesure indirecte de l'apprentissage car certains apprentissages ne s'expriment pas immédiatement après mais peuvent mettre du temps avant de se formaliser en changement de performance. Cela a été montré pour la première fois par Tolman (1930) pour qui les rats n'ont montré un changement de performance (connaissance de la configuration du labyrinthe mesuré par le temps mis pour rejoindre un point spécifique) que lorsqu'une récompense a été introduite (Tolman & Honzik, 1930a, 1930b). Il semble donc que certains facteurs influencent la performance alors que l'apprentissage lui-même est déjà réalisé. Selon Cahill et collaborateurs (Cahill et al., 2001) il est important de contrôler les facteurs comme l'attention, les aptitudes motrices, la sensibilité sensorielle, la motivation et le niveau d'éveil général lorsqu'on cherche à étudier l'apprentissage et la mémoire.

APPRENTISSAGE IMPLICITE ET EXPLICITE

Nous avons abordé brièvement les notions d'implicite et explicite lors des définitions de l'apprentissage déclaratif et procédural. Il est important de ne pas assimiler explicite avec déclaratif et implicite avec procédural. Dans une étude de confrontation de points de vue multidisciplinaire sur l'apprentissage implicite et explicite (appliqué à l'apprentissage moteur (Kleynen et al., 2015)), Kleynen et ses collaborateurs (2015) ont mis en commun et synthétisé les réponses des experts concernant les différences de ces deux apprentissages :

- L'apprentissage implicite est un apprentissage qui progresse malgré un minimum d'augmentation des connaissances verbales de la performance, et sans effort explicite, c'est-à-dire sans conscience. Pour cela il est préférable de mettre l'apprenant en condition de focus externe (à la tâche), que l'habileté soit pratiquée dans son entièreté et que les feedbacks, s'il y en a car ils ne sont pas nécessaires, portent sur les résultats.
- L'apprentissage explicite génère une connaissance verbale de la performance (faits et règles) impliquant des étapes cognitives durant le processus d'apprentissage et dépendant de l'implication de la mémoire de travail. Pour promouvoir cet apprentissage, les instructions doivent être données et contenir soit le but de la tâche, les étapes et règles à respecter ou une combinaison des deux. Les feedbacks sur la performance, les résultats et les aspects bien réussis et améliorables sont recommandés.

Le choix de passer par un apprentissage plutôt implicite ou plutôt explicite est influencé par 3 principaux facteurs : le type de tâche/habileté, les capacités de l'apprenant (physiques et cognitives) et l'étape de l'apprentissage. Ces apprentissages, qu'ils soient implicites ou explicites peuvent être réalisés selon 2 « modes » : massé et distribué.

APPRENTISSAGE MASSE, DISTRIBUE

Pour apprendre un nouveau comportement il existe 2 types d'apprentissage :

- L'apprentissage massé qui consiste en un grand nombre d'essais/entraînements sur le sujet à apprendre sur une même session, que ce soit pour du matériel verbal ou moteur
- L'apprentissage distribué qui consiste à espacer les sessions d'essais/entraînements de temps passé à faire une toute autre activité (ou à dormir). Ce type d'apprentissage correspond à celui proposé en rééducation psychomotrice, puisque les séances sont espacées dans le temps.

Dès Ebbinghaus en 1885 avec l'apprentissage de listes de mots, et depuis de nombreuses autres études, semblent montrer que l'apprentissage distribué est plus durable (Ebbinghaus, 1885). Dans une étude, 4 groupes ont été constitués et devaient apprendre à taper au clavier avec un entraînement de 1 heure ou 2 heures, à raison d'une ou 2 sessions par jour. Les performances ont été évaluées immédiatement après, puis à 1, 3 et 9 mois. C'est le groupe d'une heure par jour qui présente les meilleurs

résultats et celui de deux sessions de 2 heures qui présente les moins bons (Baddeley & Longman, 1978). L'apprentissage distribué permet d'avoir des plages de consolidation où la mémoire rentre en jeu afin de stocker le nouvel apprentissage. La consolidation est le processus qui permet d'augmenter la résistance aux interférences c'est-à-dire aux apprentissages ultérieurs qui pourraient venir effacer la trace du premier apprentissage (Brashers-Krug et al., 1996; McGaugh, 2000).

Nous allons à présent nous intéresser plus particulièrement à la mémoire ou plutôt aux mémoires permettant de formaliser nos apprentissages.

MEMOIRES

DEFINITION

Le processus de mémoire sous-tend trois capacités distinctes intrinsèquement liées :

- Encoder l'information grâce notamment aux processus attentionnels.
- Stocker l'information, la maintenir dans le temps.
- Récupérer l'information lorsque cela est nécessaire.

Si une des étapes échoue, le souvenir est alors oublié ou déformé ce qui peut conduire à une perte du souvenir ou aux faux-souvenirs. Les faux-souvenirs sont un phénomène où une personne se souvient de quelque chose qui ne s'est pas produit ou s'en souvient différemment de la façon dont il s'est réellement produit. Ils ont été largement étudiés en psychologie et notamment par Elizabeth Loftus qui s'est intéressée aux témoignages erronés dans les affaires judiciaires (Loftus, 2005; Loftus & Palmer, 1974)

Au-delà de cette subdivision en trois processus, la mémoire peut être catégorisée en fonction de la durée de rétention (court ou long terme) ou du matériel qu'elle encode, stocke et récupère.

Atkinson et Shiffrin (1968) divisent la mémoire en trois composantes structurelles intriquées : le registre sensoriel, la mémoire à court terme et la mémoire à long terme (Atkinson & Shiffrin, 1968). Les informations sensorielles entrent par le registre sensoriel, capable de les stocker 300 à 500 ms avant d'être perdues. Puis certaines d'entre elles sont sélectionnées et arrivent à la mémoire à court terme ou encore mémoire de travail qui est en relation étroite avec les informations stockées en mémoire à long terme. En mémoire à court terme ces informations peuvent subsister

quelques minutes avec au maximum 7 ± 2 items en même temps, ce que l'on appelle l'empan mnésique (Miller, 1956). Au-delà les capacités de cette mémoire sont saturées. En fonction de la répétition (et de leur intérêt pour le sujet), certaines de ces informations en mémoire de travail (partie de la mémoire à court terme qui permet non seulement le maintien temporaire des informations en mémoire mais également leur manipulation) passent en mémoire à long terme afin d'être conservées un temps indéfini. Les capacités de cette mémoire sont bien plus importantes (ici il n'est pas fait de distinction entre mémoire de travail et mémoire à court terme car cela n'est pas le sujet de ce mémoire, mais certains auteurs ont bien défini la mémoire de travail et l'ont différenciée de la mémoire à court terme (Baddeley, 2000; Baddeley & Hitch, 1974)).

Un des premiers auteurs à proposer une distinction dans la mémoire à long terme est Tulving en 1972. Il propose de mettre d'un côté la mémoire épisodique et de l'autre la mémoire sémantique « en tant que deux systèmes de traitement de l'information parallèles et se chevauchant partiellement » ((Tulving, 1972), traduction personnelle). Pour lui, la mémoire épisodique concerne les événements personnels et encode l'ensemble du contexte spatiotemporel de ces événements, tandis que la mémoire sémantique concerne toutes les connaissances décontextualisées sur le monde en général.

A partir de l'observation de patients cérébro-lésés au niveau du lobe temporal médian présentant une amnésie spécifique à ce qui a trait à une tâche d'apprentissage déclarative mais pas à une tâche d'apprentissage procédurale perceptivo-motrice, Cohen et Squire (1980 puis 2004) ont proposé une dissociation de la mémoire à long terme en mémoire déclarative et mémoire non déclarative où nous retrouvons la mémoire procédurale (Cohen & Squire, 1980; Squire, 2004) (Figure 4).

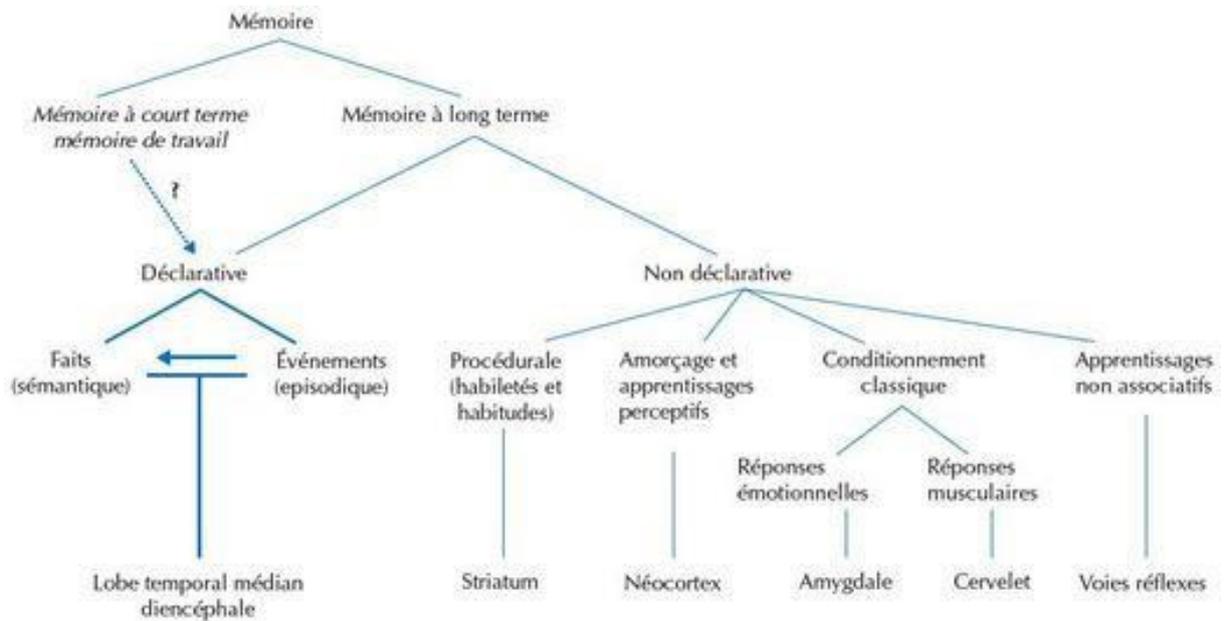


Figure 4 : Modèle de la distinction en mémoire à long terme de la mémoire déclarative et la mémoire non déclarative Squire 2004

Cette distinction entre mémoire déclarative et mémoire procédurale est retrouvée au niveau des structures cérébrales sous-jacentes. La mémoire déclarative fait intervenir les lobes temporaux médians avec notamment des circuits bidirectionnels entre le néocortex, l'hippocampe et le gyrus parahippocampique (Eichenbaum, 2000). C'est cette partie qui est atteinte chez le fameux patient H.M (Milner et al., 1968) qui est incapable de créer de nouveaux souvenirs mais qui est capable d'apprendre à suivre un tracé avec un retour visuel indirect et s'améliorer de jour en jour sans se souvenir de ses séances d'entraînement. Sa mémoire procédurale est intacte car celle-ci dépend des ganglions de la base avec notamment le noyau caudé et le striatum communiquant avec le cervelet et les régions motrices du cerveau (Packard & Knowlton, 2002) (Figure 5).

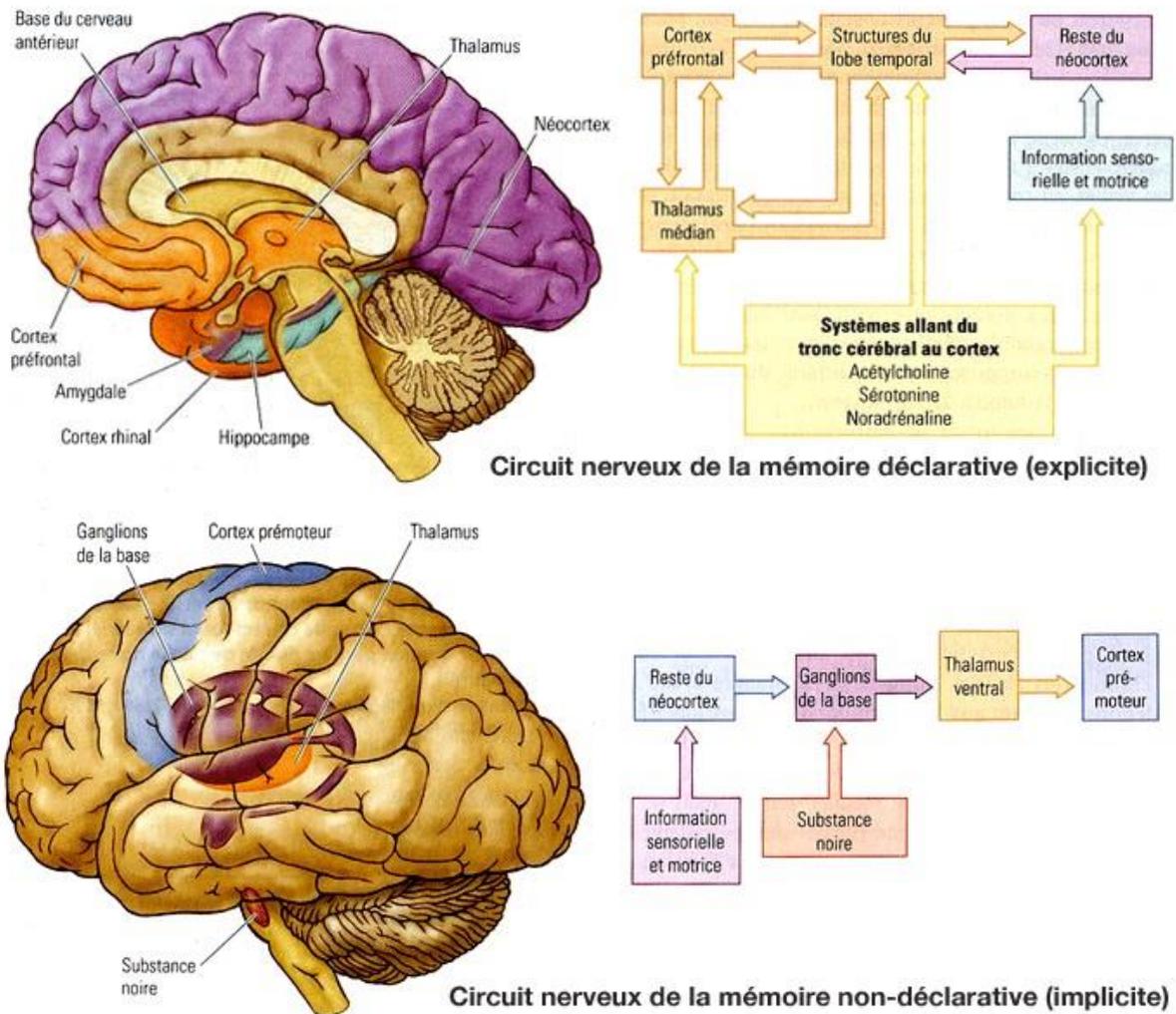


Figure 5 : Circuits cérébraux de la mémoire déclarative et de la mémoire procédurale ou non déclarative (vetopsy.fr)

Le modèle de Squire est découpé en différents systèmes de mémoire indépendants les uns des autres avec leurs propres zones cérébrales. Or, il semblerait aujourd’hui que ces systèmes soient en interaction les uns avec les autres, les souvenirs pouvant passer d’une mémoire à une autre par différents processus. C’est pourquoi un nouveau modèle a été instauré.

MEMORY NEO- STRUCTURAL INTER-SYSTEMIC MODEL (MNESIS)

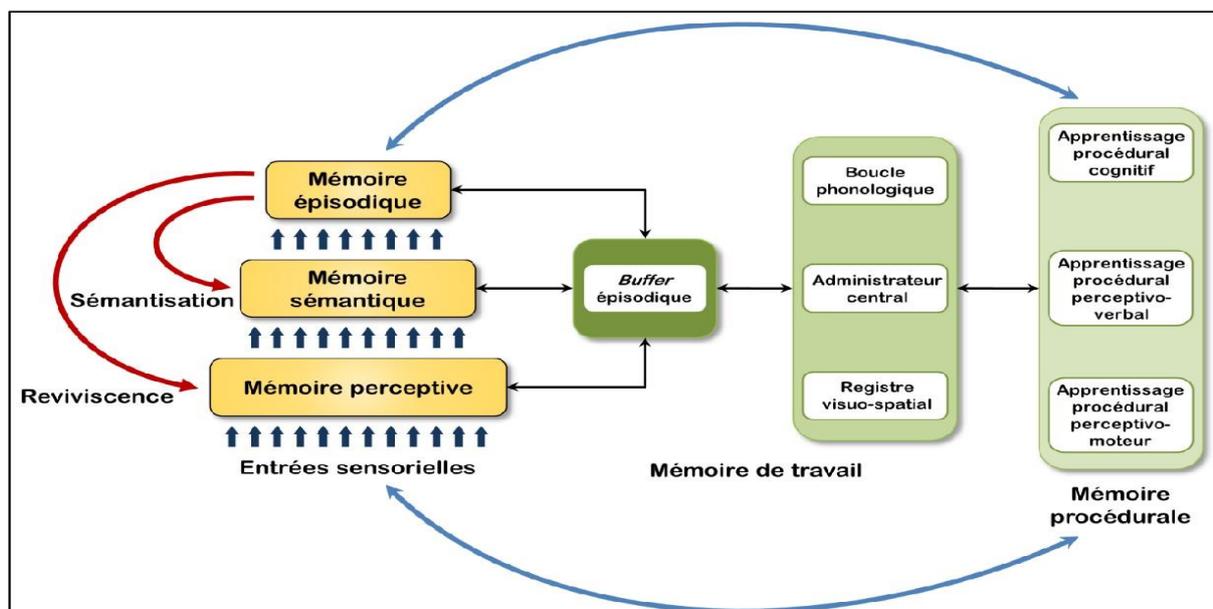
Un des modèles actuels de la mémoire est celui d’Eustache et Desgranges : MNESIS (Memory Noe-Structual Inter-Systemic Model (Eustache et al., 2016)).

Ce modèle comprend trois systèmes de mémoire à long terme (mémoire perceptuelle, mémoire sémantique, mémoire épisodique) ayant des liens hiérarchiques mais aussi

directs les uns avec les autres (Figure 6). Il existe des rétroactions possibles entre la mémoire épisodique et la mémoire sémantique avec le processus de sémantisation de la mémoire, et entre la mémoire épisodique et la mémoire perceptive avec le phénomène de consolidation lorsque des traces perceptuelles sont « revécues » et donc ré-encodée en mémoire.

La mémoire de travail est placée entre les systèmes de mémoire à long terme et la mémoire procédurale par son implication prépondérante dans ces deux mémoires. Elle est notamment importante pendant les phases d'apprentissage procédural puis devient de moins en moins nécessaire au cours de l'automatisation.

La mémoire procédurale est représentée avec 3 systèmes : l'apprentissage procédural cognitif, l'apprentissage procédural perceptivo-verbale et l'apprentissage procédural perceptivo-moteur dont nous allons reparler dans la suite de cet écrit.



A gauche, la mémoire épisodique, la mémoire sémantique et la mémoire perceptive sont en liens directs avec les entrées sensorielles passant d'abord par la mémoire perceptive puis pouvant intégrer la mémoire sémantique et la mémoire épisodique. Dans l'autre sens, un souvenir en mémoire épisodique peut passer en mémoire sémantique par le processus de sémantisation ou en mémoire perceptive par la reviviscence. Ces rétroactions insistent sur le caractère dynamique et reconstitutif de la mémoire. Au centre se trouve la mémoire de travail selon Baddeley (1974 puis 2000) avec une boucle phonologique pour le matériel verbal, registre visuo-spatial pour le matériel visuo-spatial et l'administrateur central qui fait le lien. Entre la mémoire de travail et les mémoires précédentes se trouve le buffer épisodique qui sert de pont entre les 3 systèmes mnésiques et les composants de la mémoire de travail. A droite se trouve la mémoire procédurale permettant l'apprentissage d'habiletés procédurales cognitives, perceptivo-verbale et perceptivo-motrice. Elle est en interaction avec la mémoire de travail. Il existe de même des interactions entre les systèmes de mémoire épisodique, sémantique et perceptive avec la mémoire procédurale.

DIFFERENTS APPRENTISSAGES PROCEDURAUX

La mémoire procédurale permet d'acquérir des compétences de manière progressive par le biais de l'entraînement, de la répétition d'une tâche effectuée dans des conditions matérielles et instructives constantes. Ces compétences sont ensuite stockées et récupérées sans qu'il soit nécessaire de faire appel aux expériences passées. Elles s'expriment par la performance du sujet sur une activité. Contrairement à la mémoire déclarative, le contenu de la mémoire procédurale est difficilement verbalisable et peu accessible à la conscience. C'est une mémoire assez automatique des habiletés (motrice) et habitudes (Eustache et al., 2016).

Selon Eustache et collaborateurs (2016) il existerait 3 types d'apprentissage procédural (Eustache et al., 2016) : l'apprentissage procédural cognitif, l'apprentissage procédural perceptivo-verbal et l'apprentissage procédural perceptivo-moteur.

APPRENTISSAGE PROCEDURAL COGNITIF

Les tâches procédurales cognitives sont des tâches de résolution de problème à l'aide d'une procédure. On y retrouve majoritairement trois grands types de paradigmes expérimentaux.

En premier nous avons les tâches d'apprentissage par classification probabiliste où l'apprentissage est évalué par l'augmentation du taux de prédictions correctes avec l'entraînement. La tâche la plus utilisée dans ce domaine est la Weather Prediction Task de Knowlton et collaborateurs (Knowlton et al., 1994). Ici les participants reçoivent un ensemble de cartes et doivent prédire en fonction d'elles un résultat. Un feedback leur est alors donné qui leur permettra d'affiner leur prédiction ultérieure.

Deuxièmement, la tâche de réduction du nombre (Wagner et al., 2004) a été utilisée pour étudier les phénomènes d'insight, c'est-à-dire le moment où la connaissance explicite d'une règle abstraite cachée est acquise, conduisant à un changement qualitatif brusque dans la réponse. C'est donc une découverte soudaine de la solution à un problème. Dans cette tâche les sujets doivent transformer une chaîne de 8 chiffres en une nouvelle chaîne en appliquant 2 règles simples qui leur étaient explicitement données. Cette transformation se fait pas à pas et les sujets deviennent plus rapides à

chaque essai. Mais un brusque changement de performance (en terme de temps) est observé lorsque les sujets découvrent la règle cachée (implicite) qui permet de donner une réponse fiable bien plus rapidement.

Enfin il y a les tâches de résolution de problème plus classiques et largement utilisées en psychomotricité pour évaluer notamment la planification et la résolution de problème : Tour de Londres ou Tour d'Hanoï (Shallice, 1982). Ici les sujets doivent effectuer une série de déplacements de pièces en un nombre limité de mouvements et avec quelques règles contraignantes (pas plus d'un certain nombre de pièce sur une tige, ou bien un disque plus petit ne peut pas être recouvert d'un disque plus grand). La répétition de ce genre de tâche permet d'évaluer l'automatisation de procédure de résolution de problème.

APPRENTISSAGE PROCEDURAL PERCEPTIVO-VERBAL

Les tâches perceptivo-verbales sont elles aussi au nombre de trois. Elles permettent d'évaluer l'apprentissage d'une habileté verbale par la perception.

La première et sans doute la plus connue est la tâche de lecture en miroir (Deweert et al., 1993).

Les sujets sont amenés à lire des mots présentés comme s'ils étaient écrits en miroir, de façon donc inversée. Plus les sujets s'entraînent et plus la vitesse de lecture augmente témoignant d'un apprentissage.

La seconde tâche est la discrimination de texture visuelle (Karni & Sagi, 1991) où les sujets doivent donner l'orientation d'une cible située parmi des lignes irrégulières. L'apprentissage est ici évalué par la persistance de performances correctes malgré une diminution du temps de présentation des stimuli.

La troisième tâche est le paradigme d'énumération de Hauptmann & Karni (Hauptmann & Karni, 2002). Les sujets doivent décider le plus rapidement et précisément possible si le nombre de lettres présentées sous forme d'une suite (composé de a et b) est un nombre pair ou impair. L'apprentissage est formalisé par une diminution du temps de réponse avec les essais.

APPRENTISSAGE PROCEDURAL PERCEPTIVO-MOTEUR

Le dernier type d'apprentissage procédural est l'apprentissage perceptivo-moteur qui va plus particulièrement nous intéresser pour ce mémoire. Celui-ci se divise en deux

types d'apprentissage : l'acquisition d'habileté visuomotrice (l'adaptation visuomotrice) et l'acquisition de séquences motrices.

Dans l'acquisition d'habileté visuomotrice les sujets doivent adapter leur geste pour atteindre un objectif, à leur retour visuel. Les deux tâches les plus courantes sont la poursuite rotative, la tâche de tracé en miroir.

Dans la poursuite rotative les sujets doivent garder leur stylet en contact avec une cible qui, comme le nom de la tâche l'indique, bouge sur l'écran. Seulement, la relation entre le mouvement du bras avec le stylet et le mouvement réellement réalisé par celui-ci n'est pas directe et nécessite donc un ajustement de la part des sujets (Soliveri et al., 1997).

L'apprentissage se matérialise par l'augmentation du temps de contact entre le stylet et la cible au fur et à mesure des essais.

Dans la tâche de tracé en miroir les sujets sont amenés à suivre le chemin d'une figure donnée mais en ayant un retour visuel indirect par le biais d'un miroir (Smyth, 1975). Ici l'apprentissage montre une diminution du temps de réalisation du tracé ainsi qu'une augmentation de la précision de celui-ci.

Il existe également des tâches où l'on joue sur le retour visuel par le biais de lunettes prismatiques. Le mouvement doit alors être adapté à cette perception décalée induite par les lunettes (Nemanich & Earhart, 2015).

L'acquisition de séquence motrice est la capacité de reproduire un ordre sériel de stimuli, le plus rapidement et précisément possible. L'ordre peut être connu du sujet préalablement à l'entraînement et c'est alors un apprentissage explicite, ou inconnu du sujet avant l'entraînement, l'apprentissage est alors considéré comme implicite. Dans les deux cas, avec la répétition, le temps de réponse diminue et la précision augmente témoignant d'un apprentissage effectif. Généralement, les tâches de Serial Reaction Time Task (SRTT (Nissen & Bullemer, 1987)), Alternating Serial Reaction Time (ASRT (Howard Jr. & Howard, 1997)) et Finger Taping Task (Fischer et al., 2002) sont implicites tandis que les tâches de Finger-to-thumb Opposition Task sont explicites (FOT (Karni et al., 1995)).

Dans les tâches de SRTT ou FTT, le sujet n'est pas informé qu'il se trouvera devant des séquences répétitives qu'il apprendra (mais dans certaines expériences la séquence est connue à l'avance). Il doit simplement appuyer le plus rapidement possible sur la touche du clavier correspondant à la localisation du stimulus qui vient d'apparaître. Dans le paradigme, des séquences prédéterminées sont répétées formant des essais ou

blocs et sont contrebalancées par des blocs de séquences aléatoires. A l'insu du sujet, un apprentissage a normalement lieu attesté par la diminution des temps de réaction au fur et à mesure des essais sur les séquences prédéterminées mais pas sur les séquences aléatoires. De plus il est possible de regarder la diminution du nombre d'erreurs (mauvaise touche appuyée) (Figure 7).

Cette tâche peut être réalisée avec un seul ou plusieurs doigts (FTT), en uni ou bimanuel, sur des touches de clavier ou des touches « adaptées » (pas de touches distrayantes) ou encore directement sur un écran tactile. Ces différentes modalités peuvent avoir un impact sur la réussite à la tâche. Nous reviendrons sur cela dans la partie résultats.

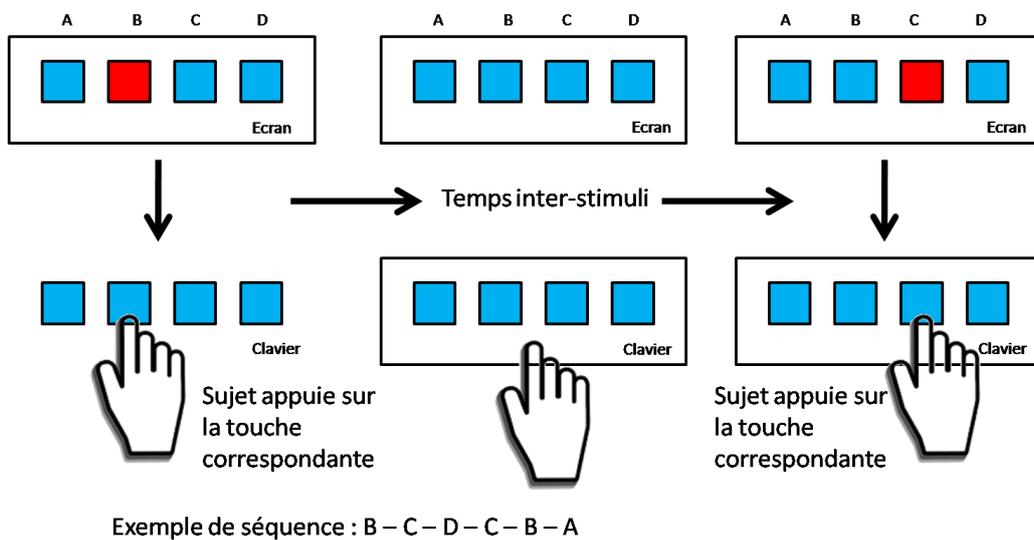
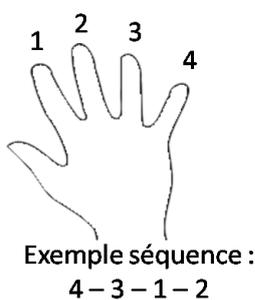


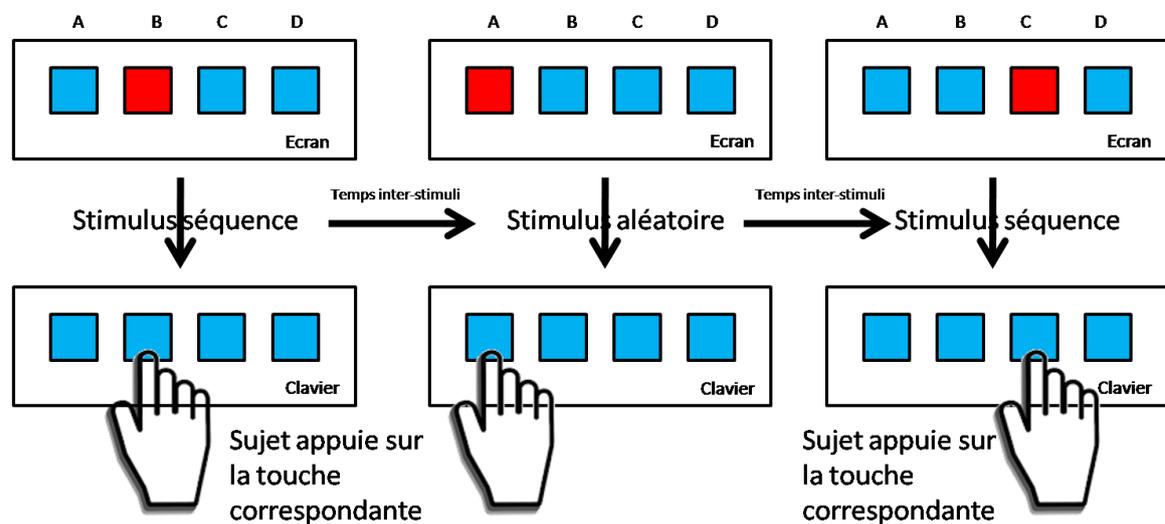
Figure 7 : Procédure d'une tâche de SRTT ou FTT (Image personnelle)



Dans la FOT, les sujets doivent opposer leur pouce aux autres doigts de la main selon une séquence prédéterminée et reproduire cela la plus rapidement et précisément possible (Figure 8). La main utilisée peut être la main dominante comme la main non dominante. Cette tâche est plus complexe sur le plan moteur à réaliser qu'une SRTT ou FTT et demande de bonnes capacités motrices (opposition de doigts) qui peuvent être un

Figure 8 : Exemple de biais dans l'évaluation de l'apprentissage d'une séquence motrice lorsque l'on s'intéresse à la vitesse notamment. De plus, il est plus difficile de mesurer précisément la vitesse de réalisation sans un appareillage spécifique.

L'ASRT repose sur le même principe que la SRTT à savoir que le sujet doit appuyer le plus rapidement et précisément possible sur la touche du clavier correspondant à la localisation du stimulus qui apparaît. Mais alors que dans la SRTT les séquences à apprendre s'enchaînent, dans l'ASRT les séquences sont entrecoupées par des localisations aléatoires ce qui rend plus difficile toute compréhension explicite de l'apprentissage d'une séquence (exemple : pour une séquence à apprendre 1-2-3-4, celle-ci se déroulera comme suit : 1 – Aléatoire – 2 – Aléatoire – 3 – Aléatoire – 4 – Aléatoire). L'alternance se fait donc à l'intérieur d'un même bloc, au sein même de la séquence à apprendre (Figure 9).



Exemple de séquence : B – Aléatoire – C – Aléatoire – A – Aléatoire – C

Figure 9 : Procédure d'une tâche d'ASRT (image personnelle)

PHASES DE L'APPRENTISSAGE PROCEDURAL

D'après le modèle Adaptive Control of Thought d'Anderson ((Anderson, 1982) tenant lui-même de Fitts 1964) puis remis à l'ordre du jour par Beaunieux et collaborateurs (2006), un apprentissage procédural passe par 3 phases et implique de nombreux systèmes cognitifs tels que la mémoire de travail, les processus attentionnelles et même la mémoire déclarative (Beaunieux et al., 2006).

La première phase est la phase cognitive (what is to be done ?) où le sujet découvre la procédure, l'habileté qu'il va devoir apprendre. Dans cette phase, la mémoire de

travail et la mémoire déclarative sont importantes car le sujet doit répéter l'action dans son ensemble plusieurs fois afin d'atteindre le but qu'il s'est fixé. La performance est à cette phase aléatoire puisqu'il cherche la stratégie la plus efficace pour réaliser son comportement. Il commet donc de nombreuses erreurs.

La seconde phase est la phase associative (how to do ?) où il associe un pattern comportemental spécifique aux résultats attendus. Il commence donc à contrôler son action, à devenir plus précis et rapide. L'importance de la mémoire déclarative chute tandis qu'une représentation procédurale du comportement se met en place.

La dernière phase est la phase autonome ou d'automatisation (just do it). Le sujet ne s'appuie plus que sur ses connaissances procédurales pour réaliser le comportement qu'il fait de la façon la plus efficace qu'il soit sans avoir à y prêter attention. A cette étape, une tâche concurrente n'entraîne pas d'interférence.

PSYCHOMOTRICITE ET APPRENTISSAGE PROCEDURAL PERCEPTIVO-MOTEUR

Après avoir revu les différents types d'apprentissages procéduraux il semble que l'apprentissage perceptivo-moteur puisse intéresser plus particulièrement les psychomotriciens. En effet comme dit lors de l'introduction, les psychomotriciens sont spécialistes des troubles psychomoteurs eux-mêmes étant des troubles perceptivo-moteurs affectant les fonctions d'exploration (aspects perceptifs) et d'action (sur le milieu physique) (Corraze, 2010). Or, l'acquisition d'habiletés visuomotrice nécessite une bonne exploration de l'environnement et de ses aspects perceptifs pour adapter l'action aux contraintes de celui-ci. De même, l'apprentissage de séquences motrices nécessite des séries d'actions en fonction des informations données par l'environnement. Le lien entre l'environnement et l'action est ici primordial et conditionne la réussite ou l'échec de l'apprentissage. L'apprentissage procédural perceptivo-moteur est donc au cœur de notre métier de psychomotricien. C'est pourquoi nous avons choisi, pour ce mémoire, de nous focaliser sur cet apprentissage procédural plutôt que les deux autres. Néanmoins il faut garder à l'esprit

que les apprentissages procéduraux cognitifs et perceptivo-moteurs peuvent tout à fait être pris en charge par des psychomotriciens.

L'APPRENTISSAGE PROCEDURAL PERCEPTIVO-MOTEUR

MODELE DE DOYON

Nous avons vu précédemment que l'apprentissage procédural se ferait en 3 phases respectivement une phase cognitive, une phase associative et une phase autonome (Beaunieux et al., 2006). Pour l'apprentissage procédurale, ces phases sont définie plus spécifiquement comme suit (Doyon et al., 2003) :

La première phase est la phase d'apprentissage rapide qui correspond à l'entraînement initial et sa répétition. La performance est caractérisée par une amélioration importante au sein même d'une seule session.

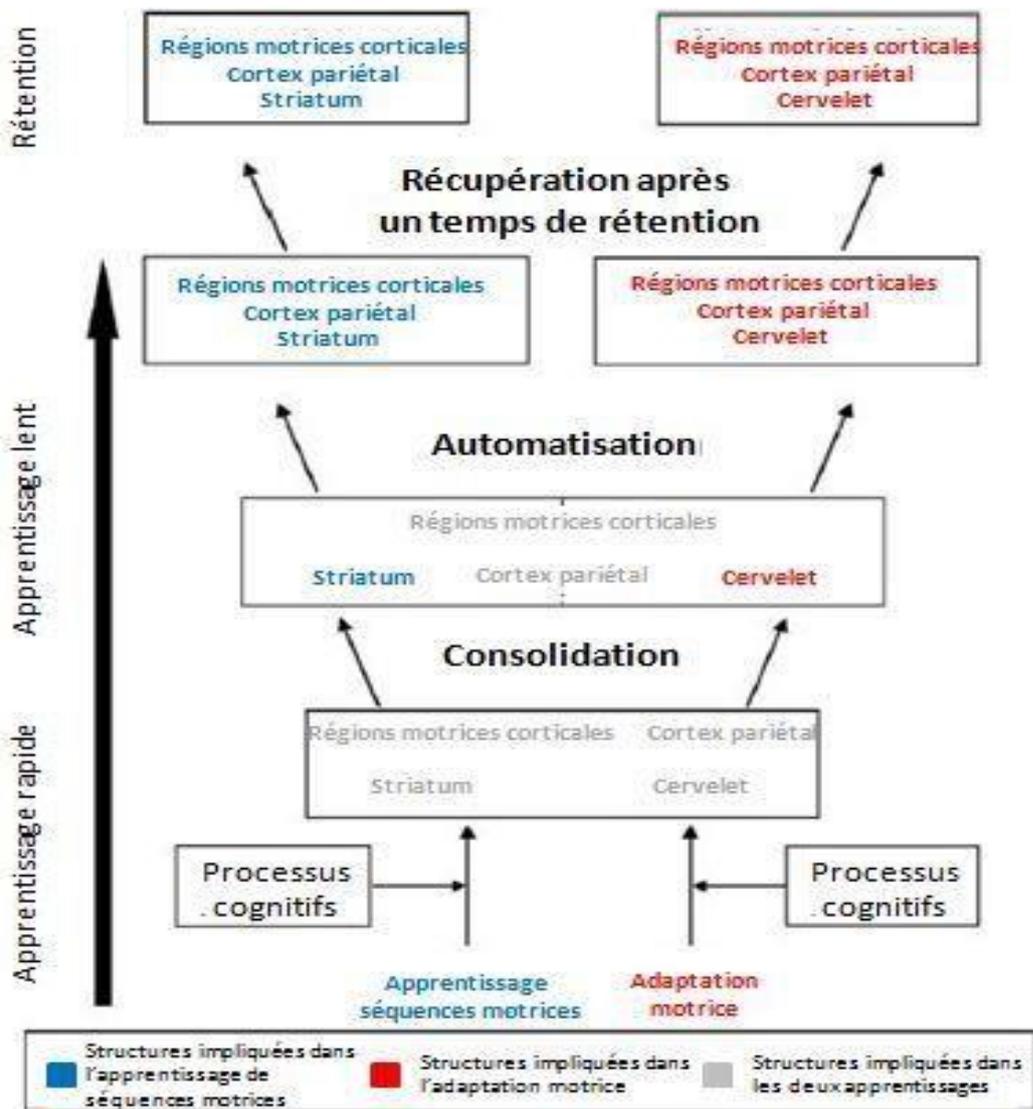
Dès cette première phase s'amorcerait une phase de consolidation qui continuerait pendant la phase suivante. Elle se fait essentiellement dans les temps d'intervalle entre les entraînements et a pour but de créer une trace mnésique de la tâche qui se renforcera et se stabilisera au fur et à mesure de l'entraînement.

Ensuite vient la phase d'acquisition lente où la performance continue de s'améliorer mais de façon moins importante et s'échelonnant sur de nombreuses sessions.

Enfin vient la phase d'automatisation où la performance ne s'améliore plus. La trace mnésique serait alors durable et résistance à l'interférence.

Julien Doyon est un chercheur de Montréal qui s'est particulièrement intéressé aux réseaux neuronaux associés à l'acquisition d'habiletés motrices en menant diverses expériences en imagerie avec des sujets sains et des patients ayant diverses atteintes neurologiques. Il a réalisé un modèle en 2003 sur les activations cérébrales de l'apprentissage procédural perceptivo-moteur en faisant une distinction entre l'apprentissage séquentiel et l'apprentissage d'adaptation visuo-motrice (Doyon et al., 2003). Ce modèle a été confirmé puis amélioré par ses collaborateurs et lui-même dans de nombreuses autres publications (Doyon et al., 2009, 2017; Doyon & Benali, 2005).

D'après son modèle princeps, les phases de l'apprentissage sont associées à des activations cérébrales différentes. Lors de la phase d'apprentissage rapide, l'activation cérébrale concernerait majoritairement le striatum, le cervelet ainsi que des régions motrices comme le cortex moteur primaire, le cortex prémoteur et l'aire motrice supplémentaire. De plus, une activation du cortex préfrontal et du cortex pariétal est retrouvée. La consolidation serait également sous la direction du cervelet et du striatum. Puis ce pattern d'activation tend à se modifier avec l'entraînement (arrivée en phase d'acquisition plus lente puis d'automatisation) et la forme de l'apprentissage. Pour l'apprentissage séquentiel il y aurait une diminution de l'engagement du cervelet parallèlement à une augmentation de l'implication des noyaux de la base (striatum) et inversement pour l'adaptation motrice. Enfin, après un long moment de rétention sans pratique, les mêmes circuits cérébraux seraient réactivés. Donc les phases d'apprentissage précoces seraient dépendantes des réseaux cortico-striataux et corticocérébelleux tandis que la phase d'automatisation et la réactivation un long moment après l'apprentissage reposeraient essentiellement sur le réseau cortico-striatal pour les séquences motrices et sur le réseau cortico-cérébelleux pour l'adaptation motrice (Figure 10).



Dans la phase d'apprentissage rapide, les régions cérébrales impliquées dans l'apprentissage de séquences motrices et dans l'adaptation motrice sont identique à savoir les régions corticales motrices, le cortex pariétal, le striatum et le cervelet. Les régions corticales motrices et le cortex pariétal restent impliqués dans les deux apprentissages quelle que soit la phase d'apprentissage / rétention. Pour la consolidation, l'automatisation et la rétention de l'apprentissage de séquence motrice, le striatum sera largement impliqué et disparition de l'implication du cervelet. Pattern inverse avec implication du cervelet mais pas du striatum dans l'adaptation motrice.

Figure 10 : Modèle neuroanatomique de l'apprentissage de séquences motrices et d'adaptation motrice évoluant en fonction des phases d'apprentissage (traduit de Doyon 2003)

Par la suite Doyon a ajouté l'implication de l'hippocampe dans la phase précoce d'apprentissage même si celle-ci n'est pas essentielle (des patients ayant des dommages aux lobe temporaux médians sont capables d'apprentissages procéduraux et de leur rétention) et que la plasticité cérébrale de ces apprentissages en phase rapide se fait non seulement en intersystème mais également en intra-système (Doyon & Benali, 2005). Par exemple, il y a un changement de la représentation motrice durant

la phase d'apprentissage rapide de séquences motrices allant des territoires associatifs aux territoires sensorimoteurs du striatum. Il en est de même pour la contribution du cervelet en début d'apprentissage séquentiel avec une implication importante du cortex cérébelleux qui diminue au profit d'une activation du noyau denté du cervelet (Doyon et al., 2009).

De même, une certaine compensation du circuit cortico-striatal déficient, comme chez les patients Parkinsoniens, pour atteindre des performances équivalentes est possible par le circuit cortico-cérébelleux (Doyon & Benali, 2005).

DISTINCTION	ENTRE	APPRENTISSAGE	PROCEDURAL
SEQUENTIEL	ET	APPRENTISSAGE	PROCEDURAL
D'ADAPTATION VISUO-MOTRICE			

L'apprentissage procédural d'adaptation visuo-motrice et l'apprentissage procédural séquentiel peuvent donc être distingués sur plusieurs domaines. Tout d'abord, tous deux reposent sur des circuits cérébraux différents (Doyon et al., 2003). De plus, l'un s'intéresse à un mouvement plus ou moins élaboré et continu (adaptation visuo-motrice) tandis que l'autre nécessite une répétition de mouvements très simples comme appuyer sur un bouton ou sur un doigt (apprentissage procédural séquentiel). Enfin, l'apprentissage d'adaptation visuo-motrice est un apprentissage qui se fait essentiellement par essais-erreurs tandis que l'apprentissage séquentiel serait de l'ordre de l'apprentissage implicite.

ADAPTATION VISUO -MOTRICE

L'adaptation visuo-motrice correspond à la modification d'un mouvement au fil des essais sur la base d'un feedback sur l'erreur. Cet apprentissage engage l'olive inférieure, les noyaux pontocérébelleux et une partie du cortex situé sur le territoire de l'artère cérébelleuse postérieure inférieure (Martin et al., 1996). Ces apprentissages sont basés sur un retour visuel erroné ou du moins modifié qui déstabilise le sujet au début. Il doit alors comprendre qu'elle est la déformation perceptive et comment s'y adapter pour que le geste qu'il a engagé convienne à l'objectif initial. Cela fait donc appel à des capacités d'adaptation en temps réel par le biais de boucles rétroactives. Typiquement, les patients cérébelleux présentent un déficit d'adaptation motrice (Bernard & Seidler, 2013; Donchin et al., 2012; Sanes et al., 1990).

SEQUENCES MOTRICES

« L'apprentissage de séquences motrices implique l'intégration de mouvements séparés en une séquence unifiée et coordonnée d'actions au travers de la pratique » (traduction personnelle, (Doyon et al., 2017)). Cet apprentissage est relié à l'activation des régions corticales motrices, du cervelet, du thalamus, et surtout du striatum avec notamment la tête du noyau caudé et le putamen antérieur (Hazeltine et al., 1997; Peigneux et al., 2000). Ici il n'y a pas de distorsion perceptive entre ce qui est vu et ce qui est réalisé, l'adaptation demandée porte sur la rapidité de la réalisation des séquences. Les patients présentant une atteinte des ganglions de la base, comme les malades de Parkinson expriment des difficultés d'apprentissage de séquences (Clark et al., 2014; Ruitenberg et al., 2015).

MODELE DOYON 2017 DE L'APPRENTISSAGE DE SEQUENCES MOTRICES

Plus récemment, Doyon a mis à jour son modèle pour l'apprentissage procédural de séquences motrices uniquement (Doyon et al., 2017). Dans celui-ci il indique, comme précédemment, la variation de l'implication (constance, augmentation ou diminution), en phase d'apprentissage rapide, de l'hippocampe (Hipp), des régions motrices (MCR), du striatum parties associatives et sensorimotrices (ST) du cortex cérébelleux (CB – CC) et du noyau denté (CB – CN), du cortex pariétal (PC), du cortex frontal associatif (FAR). De plus, il rajoute l'implication de la moelle spinale (SC) (Figure 11).

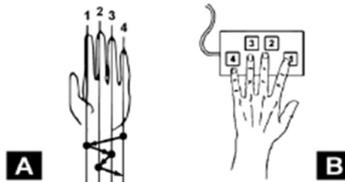
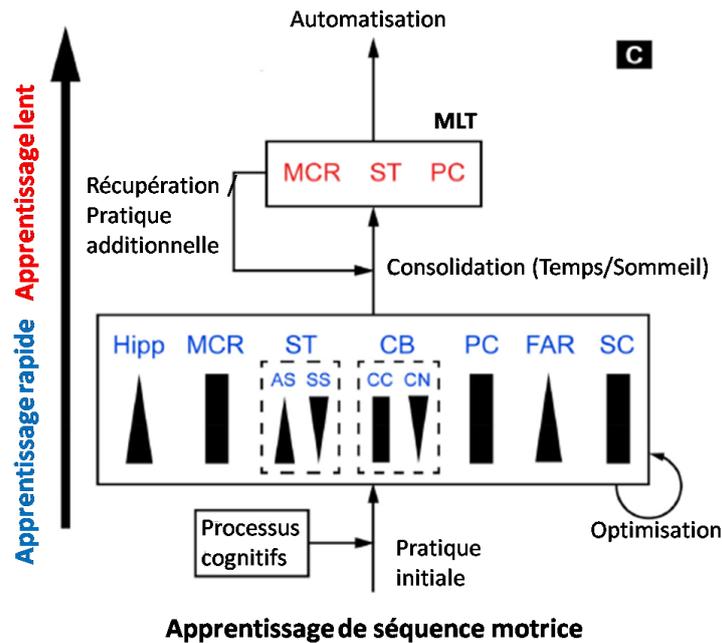


Illustration dépeignant les deux tâches expérimentales les plus souvent utilisées pour évaluer l'apprentissage de séquences motrices chez les humains. (A) Finger-to-thumb Opposition Task et (B) Finger Tapping Task. (C) Modèle neurobiologique de la plasticité cérébrale associé à l'apprentissage moteur de séquences en fonction de la phase d'apprentissage rapide ou lente. Durant la phase initiale de pratique, les structures impliquées sont le striatum, le cervelet, l'hippocampe, la moelle épinière, les régions motrices corticales (cortex prémoteur, cortex moteur associatif, cortex prémoteur et cingulaire antérieur) ainsi que les aires corticales préfrontales et pariétales. Le rectangle ainsi que les triangles vers le haut ou le bas reflètent, respectivement, la constance, l'augmentation ou la diminution de l'engagement de structures cérébrales particulières pendant l'apprentissage de séquences. Pendant cette phase, les interactions entre ces structures sont critiques pour établir les routines motrices nécessaires à l'apprentissage moteur séquentiel et pour développer une représentation de la séquence optimisée.

Avec la progression de l'apprentissage, les processus de consolidation dépendant du temps et/ou du sommeil se mettent en place durant la phase d'apprentissage lent et la représentation en mémoire change. Par conséquent, lorsqu'une tâche motrice est bien apprise et que les performances asymptotiques sont atteintes, la représentation à long terme de la séquence motrice est censée être répartie au sein d'un réseau de structures qui implique principalement le circuit cortico-striatal (striatum, régions motrices corticales et régions pariétales). De plus, tout en récupérant ou en pratiquant une séquence motrice bien apprise et consolidée, le modèle postule que le même réseau cortico-striatal est réactivé et que la plasticité induite par la récupération implique l'intégration de nouvelles informations par le biais de processus de consolidation. Après une pratique approfondie (en plusieurs sessions) et une consolidation des compétences associée, les comportements moteurs qualifiés ont tendance à être exécutés sans effort et avec peu de ressources attentionnelles pour réussir.

Hipp: Hippocampe; MCR: Régions Corticales Motrices; ST: Striatum; CB: Cervelet PC: Cortex Pariétal; FAR: Régions Frontales Associatives; SC: Moelle Spinale; AS: Striatum Associatif ; SS: Striatum Sensorimoteur; CC: Cortex Cérébelleux;

CN: Noyaux Cérébelleux; MLT: Mémoire à Long Terme

Figure 11 : Modèle de l'apprentissage procédural de séquence (traduit de Doyon 2017)

En effet, il a été montré dans une étude récente (Vahdat et al., 2015) qu'une partie importante de la modulation de l'activité liée à l'apprentissage est indépendante des structures précédemment citées mais reviendrait à une modulation d'activité au niveau de la région vertébrale C6 – C8. De plus, après avoir analysé la connectivité fonctionnelle entre le cerveau et la moelle épinière, ils ont montré une diminution de relation entre la moelle épinière et le cortex sensorimoteur avec l'apprentissage parallèlement à une augmentation de cette connectivité entre la celle-ci et le cervelet. Ils en ont donc conclu que la moelle épinière a un rôle fonctionnel dans cet apprentissage et que celui-ci est distinct du rôle du cerveau.

Les phases d'apprentissage lent et d'automatisation n'ont pas été changées.

De plus, Doyon et collaborateurs précisent que lors de la phase d'acquisition précoce la tâche est perçue selon une représentation allocentrique ou visuospatiale médiée par les régions cérébelleuses et striatales associatives en lien avec les régions préfrontales et prémotrices.

Avec l'entraînement la représentation devient égocentrique, basée sur le mouvement moteur en lui-même grâce notamment à l'augmentation de la participation des régions sensorimotrices du striatum (Doyon et al., 2017).

DEVELOPPEMENT TYPIQUE DE L'APPRENTISSAGE PROCEDURAL

L'objectif de ce mémoire est d'évaluer l'intérêt de développer un outil d'évaluation de l'apprentissage procédural pour les psychomotriciens. Cet outil doit donc répondre à un besoin, évaluer l'écart entre les performances dites « typiques » en apprentissage procédural et les performances des patients venant consulter, afin d'élaborer par la suite une rééducation permettant de se rapprocher de la norme. L'intérêt de se rapprocher de la norme n'est pas tellement d'être comme tout le monde ou que la norme est l'idéal, mais simplement que les sujets qui s'en écartent peuvent présenter des difficultés d'adaptation ce qui peut générer un réel désavantage voire une situation de handicap dans la vie de tous les jours. C'est pourquoi il est important de définir le

développement typique de l'apprentissage procédural, la norme, afin d'évaluer d'éventuels écarts à celle-ci.

Zwart et collaborateurs ont récemment réalisé une revue systématique s'intéressant au développement de l'apprentissage procédural et de ses implications pour le développement atypique sur laquelle nous allons nous appuyer (Zwart et al., 2018). Ils dégagent 3 modèles de développement : un modèle d'invariance développementale, un modèle avec un pic chez les jeunes adultes et un modèle avec un plateau dès l'enfance puis un déclin (Figure 12).

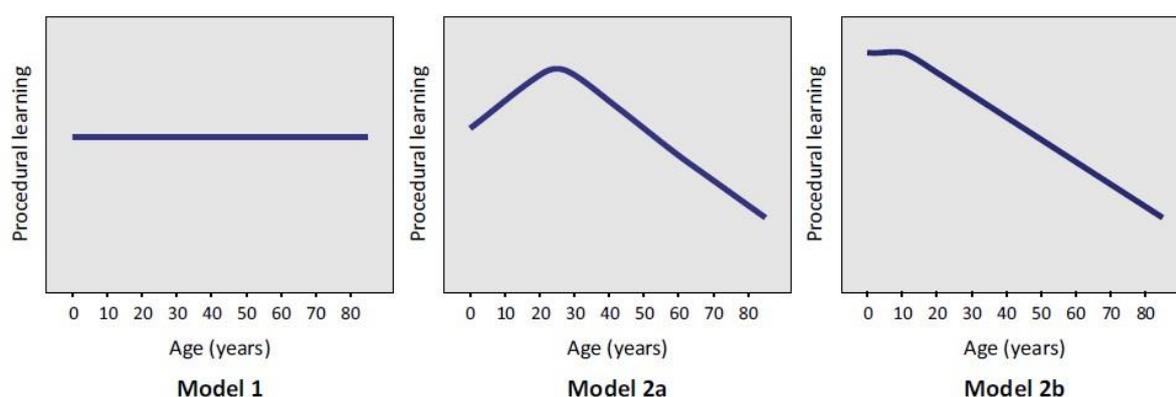


Figure 12. Schématique de représentation de développement de l'apprentissage procédural avec le modèle 1 (à gauche) montrant un développement invariant, le modèle 2a (centre) montrant un pic dans la période jeune adulte, et le modèle 2b (à droite) montrant un plateau important dans l'enfance suivi par un déclin à partir de l'adolescence.

Figure 12 : 3 modèles du développement de l'apprentissage procédural selon l'étude de Zwart et coll. (2018)

MODELE DE L'INVARIANCE DEVELOPPEMENTALE

L'apprentissage procédural a pour spécificité de ne pas nécessiter de langage ou connaissances verbales spécifiques ce qui permet de conjecturer son développement plus précoce par rapport à l'apprentissage déclaratif. Pour certains auteurs (Meulemans et al., 1998; Thomas & Nelson, 2001) il y aurait donc une émergence très précoce des aptitudes procédurales ainsi qu'une stabilité dans le temps. Ces auteurs s'appuient sur le fait que l'apprentissage procédural est majoritairement relié à des régions cérébrales phylogénétiquement anciennes (noyaux de la base, cervelet) qui mûrissent précocement. Dans les expériences menées pour valider cette théorie, la première à voir le jour est celle de

Meulemans et collaborateurs qui montre qu'il n'existe pas de différence dans les performances d'apprentissage à une tâche de SRTT (version implicite) entre les enfants de 6 et 10 ans et les jeunes adultes (Figure 13).

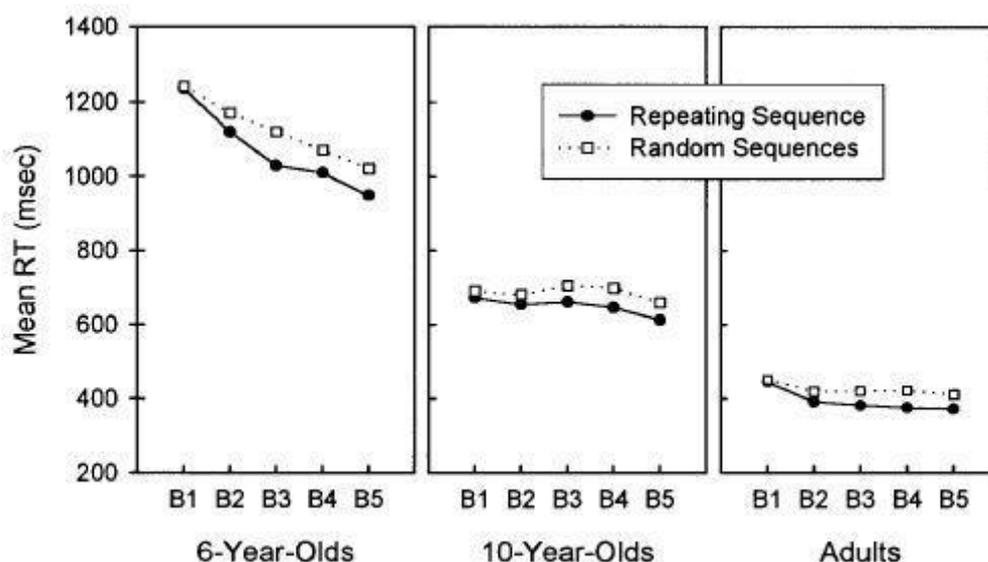


Figure 13 : Temps de réaction moyen en fonction du groupe (6 ans, 10 ans, adultes), du bloc (1, 2, 3, 4, 5) et du type de séquence (répétée ou aléatoire) (Meulemans et al., 1998)

Il existe par contre des différences en terme de temps de réaction et de précision de réponse et ceux dès 4 ans (Thomas & Nelson, 2001). Pour ces auteurs comme d'autres plus tard, le temps de réaction n'est pas relié à l'apprentissage procédural en tant que tel et doit donc être corrigé en fonction de la ligne de base (normalisé), ce qui importe c'est la différence dans les temps de réaction en fonction du type de bloc (aléatoire ou séquence à apprendre). Les plus jeunes sont plus lents mais cela n'impacte en rien leur capacité d'apprentissage de la séquence. On remarque également que ce sont les plus jeunes qui améliorent le plus leur temps de réaction témoignant d'une amélioration motrice importante avec les essais.

Au total ce sont 17 des 50 études de la revue systématique qui vont dans le sens d'une invariance développementale ce qui en fait donc un modèle minoritaire.

MODELES DE CHANGEMENT EN FONCTION DE L'AGE

Les deux modèles suivants postulent tout deux qu'il existe un changement de performance en apprentissage procédural en fonction de l'âge.

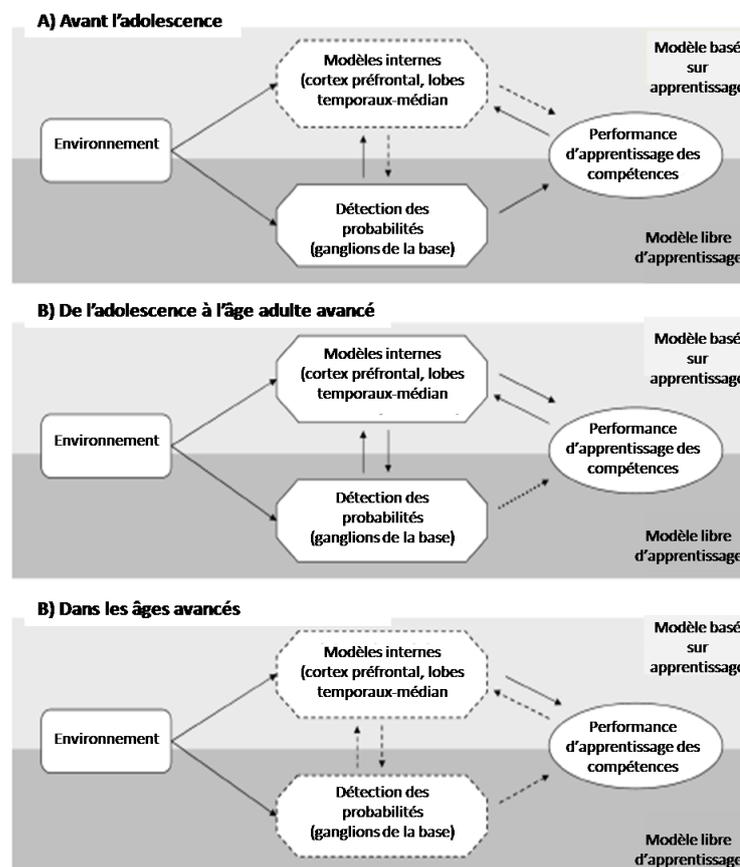
MODELE AVEC PIC DE PERFORMANCE CHEZ LES JEUNES ADULTES

Dans ce modèle, l'apprentissage procédural s'améliore avec l'âge jusqu'au stade de jeune adulte puis diminue avec l'avancé en âge. Cela a été défendu dès 2004 par Thomas et collaborateurs qui montrent une amélioration du temps de réaction et de la précision entre l'enfance et le jeune adulte sur la base de données normalisées (Thomas et al., 2004). (Ce sont les mêmes auteurs qui avaient montré auparavant une capacité d'apprentissage identique entre 3 groupes d'enfants de 4, 6 et 10 ans mais n'avaient pas comparés avec des adultes). L'explication résiderait dans des différences d'activité cérébrale. Les auteurs montrent notamment une activité plus importante de l'hippocampe qui permettrait un apprentissage plus rapide chez les adultes. De plus, la maturation du corps calleux serait importante et déterminerait l'apprentissage séquentiel lorsque la tâche de SRTT se fait en bimanuel contrairement à de l'unimanuel (De Guise & Lassonde, 2001). C'est un point important qu'il faudra garder à l'esprit lors de la création d'un outil d'évaluation de l'apprentissage procédural.

MODELE AVEC DECLIN DES PERFORMANCES APRES L'ENFANCE

Ici les performances procédurales sont maximales dès l'enfance puis déclinent avec le vieillissement. Ce modèle vient surtout de l'étude de Janacek et collaborateurs (Janacek et al., 2012) qui a réuni 421 participants de l'âge de 4 ans à 85 ans. Ils ont montré sur une tâche d'ASRT que ce sont les enfants entre 4 et 12 ans qui ont présenté un apprentissage plus importants que tous les autres groupes d'âge (en temps de réaction). De plus, l'apprentissage était diminué chez les 60-85 ans par rapport aux adultes. Mais si l'on s'intéresse aux données normalisées, les 4 – 8 ans comme les 45 – 85 ans ont des performances moins élevées que les 9 – 44 ans que ce soit en temps de réaction ou en précision. Ils en concluent que leurs résultats montrent un déclin graduel de l'apprentissage au cours de la vie. Pour eux, les moins bons scores de précision seraient du aux circuits cérébraux attentionnels sous développés, chez les plus jeunes ou détériorés chez les plus âgés. Ils expliquent ce meilleur apprentissage de séquences motrices par la compétition entre deux sous-systèmes neurocognitifs : un « basé sur modèle » et un « libre de modèle » (model-based et model-free). Le système libre de modèle serait sous-tendu par les ganglions de la base et permettrait

de détecter les probabilités brutes de l'environnement, sans avoir d'idées préconçues donc de biais attentionnel. Il serait prédominant chez les jeunes enfants qui n'ont pas encore de système basé sur modèle. Puis en grandissant, le système basé sur modèle sous-tendu par le cortex frontal et les lobes temporaux médians devient de plus en plus prédominant. Ce système agit comme un filtre sur les stimuli de l'environnement avec certaines attentes (en fonction des expériences déjà vécues) et empêcherait une détection rapide des probabilités statistiques brutes. Ce phénomène s'accroîtrait dans le vieillissement avec une rigidification du système basé sur modèle, une diminution de la contribution du système libre de modèles ou une diminution de la connexion entre ces deux systèmes (Figure 14).



Compétition entre les systèmes neurocognitifs des modèles basé sur l'apprentissage ou libre d'apprentissage. (A) Avant l'adolescence, les modèles internes sont sous-développés (limites en pointillées) et ont peu d'influence sur l'interprétation des probabilités statistiques brutes détectées. Les performances d'apprentissage de compétences sont déterminées par les probabilités brutes. (B) De l'adolescence à l'âge adulte avancé, les modèles internes sont bien développés (limites pleines) et modulent fortement les interprétations des statistiques observées. Cela aide à extraire les relations complexes mais altèrent relativement la mesure et l'utilisation des probabilités brutes dans l'apprentissage de compétences (flèches en pointillées). (C) Dans les âges plus avancés, les performances d'apprentissage de compétences diminuent. Ce déclin peut être causé par la combinaison d'une réduction de

sensibilité aux probabilités statistiques brutes (limites en pointillées), des modèles internes de plus en plus rigides (limites en pointillées) et/ou une connexion plus faible entre ces systèmes (flèche en pointillée)

Figure 14 : Changement avec l'avancé en âge de la prédominance du model-basé sur l'apprentissage ou du modèle libre d'apprentissage (traduit de Janacek et al., 2012)

CONCLUSION SUR LE DEVELOPPEMENT DE L'APPRENTISSAGE PROCEDURAL

Selon Zwart et collaborateurs il existerait 3 modèles du développement de l'apprentissage procédural. Le moins soutenu par les publications sélectionnées pour la revue de littérature est celui de l'invariance développementale. Les deux autres modèles sont supportés par une majorité d'études et le choix de l'un ou l'autre des modèles dépendrait surtout de l'utilisation des données brutes ou normalisées. Pour autant, dans le modèle avec pic chez l'adulte, aucune étude ne s'est intéressée à la personne âgée ce qui est un peu contradictoire avec le postulat qu'il y ait une détérioration de l'apprentissage procédurale dans cette population. De plus, certaines études non citées semblent au contraire montrer un maintien de l'apprentissage procédural chez les personnes âgées avec des performances similaires à de jeunes adultes ou d'âges « moyens » (Cherry & Stadler, 1995; Gaillard et al., 2009). Mais d'autres études, et notamment celle de Janacek montrent un déclin des performances à un âge avancé et explique l'absence de résultats des études précédentes par l'utilisation d'une SRTT classique peut-être un peu « trop facile » (Janacek et al., 2012).

Il faudra donc faire attention lors du développement de l'outil d'évaluation de l'apprentissage procédural au degré de difficulté qui semble le plus cohérent pour ne pas avoir ni d'effets planchers ni d'effets plafonds.

THEORIE DU DEFICIT D'APPRENTISSAGE PROCEDURAL DANS LES TROUBLES NEURODEVELOPPEMENTAUX

Selon le DSM-V, les troubles neurodéveloppementaux sont un ensemble d'affections qui débutent durant la période du développement. Ils se manifestent précocement et sont caractérisés par des déficits du développement entraînant une altération du

fonctionnement personnel, social, scolaire ou professionnel. Ils sont actuellement classés sous 7 catégories :

- Handicaps Intellectuels avec, le Trouble du Développement Intellectuel (TDI), le Retard Global du Développement et le Trouble du Développement Intellectuel non spécifié
- Troubles de la Communication avec, le Trouble du Langage, Trouble de la Phonation, le Bégaiement, Trouble de la Communication Sociale (pragmatique) et le Trouble de la Communication non spécifiée
- Trouble du Spectre de l'Autisme (TSA)
- Déficit de l'Attention/Hyperactivité (TDA/H)
- Trouble Spécifique des Apprentissages (lecture, expression écrite, calcul)
- Troubles Moteurs avec le Trouble Développementale de la Coordination (TDC), les Mouvements stéréotypés, le Syndrome de Gilles de la Tourette (SGT), les Tics moteurs ou vocaux persistants, les tics provisoires, autres Tics spécifiés et Tics non spécifiés
- Autres Troubles Neurodéveloppementaux avec Autre Trouble Neurodéveloppemental Spécifié et Trouble Neurodéveloppemental non spécifié

Les symptômes peuvent être positifs, c'est-à-dire en plus du fonctionnement normal (comme une hypersensibilité sensorielle dans les Troubles du Spectre de l'Autisme ; TSA) ou négatifs, c'est-à-dire qu'il y a un déficit dans le fonctionnement (comme un trouble de l'adaptation dans les Troubles du Développement Intellectuel ; TDI). Ces troubles sont souvent comorbides (American Psychiatric Association, 2015).

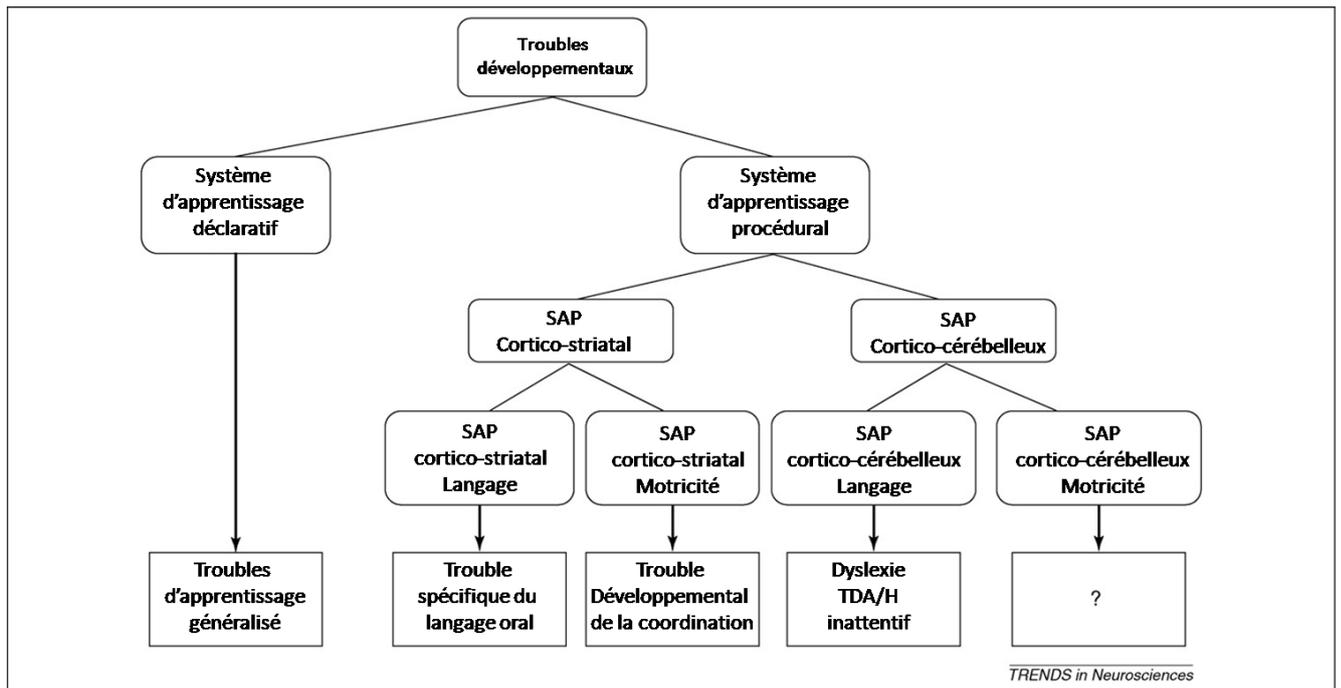
Lorsque l'on s'intéresse à un déficit d'apprentissage procédural, en tant que psychomotricien nous pensons directement au Trouble Développementale de la Coordination (TDC). C'est un trouble caractérisé par des difficultés importantes dans l'acquisition et l'exécution des coordinations motrices se traduisant par de la maladresse, de la lenteur et de l'imprécision (American Psychiatric Association, 2015). Nous nous attendons typiquement à retrouver un déficit d'apprentissage procédural dans ce trouble. Mais qu'en est-il des autres troubles du neurodéveloppement ? Certains auteurs ont mis en avant la théorie du déficit d'apprentissage procédural dans les troubles neurodéveloppementaux, étendant donc ce déficit à un ensemble plus large que le TDC.

MODELE DE NICOLSON ET FAWCETT 2007

Pour Nicolson et Fawcett les recherches sur les troubles neurodéveloppementaux étaient tournées sur les différences existantes plutôt que sur les points communs et s'éloignaient donc peut-être de l'origine même de ces troubles (Nicolson & Fawcett, 2007). Ils ont donc proposé une réunification des troubles neurodéveloppementaux par une approche des « systèmes neuronaux » (Figure 15). D'après leurs recherches, les troubles spécifiques du langage (TSL), le trouble développemental de la coordination, la dyslexie et la forme inattentive du Trouble

Déficitaire de l'Attention/Hyperactivité (TDA/H) auraient tous pour origine un déficit du système d'apprentissage procédural. Basé sur les travaux de Doyon et collaborateurs (Doyon et al., 2003; Doyon & Benali, 2005), ils ont séparés les atteintes du système procédural en atteinte du circuit cortico-striatal ou du circuit cortico-cérébelleux divisant ainsi les troubles spécifiques du langage et le TDC d'un côté et la dyslexie et le TDA/H inattentif de l'autre. Ils ont subdivisés encore les circuits en un circuit plutôt langagier et un circuit plutôt moteur. Au final cela donne la classification suivante :

- Atteinte du circuit langagier cortico-striatal : Troubles spécifiques du langage
- Atteinte du circuit moteur cortico-striatal : Trouble développemental de la coordination
- Atteinte du circuit langagier cortico-cérébelleux : Dyslexie ou TDA/H forme inattentive
- Atteinte du circuit moteur cortico-cérébelleux : Pas de trouble associé à ce jour
- Les troubles spécifiques des apprentissages sont mis dans une catégorie à part, sans atteinte du système procédural mais plutôt du système d'apprentissage déclaratif



Les troubles développementaux peuvent provenir de différentes atteintes. 1^{ère} distinction entre le système d'apprentissage déclaratif et le système d'apprentissage procédural (SAP). Le système d'apprentissage déclaratif donne les troubles d'apprentissage généralisés. Le système procédural est divisé en un circuit cortico-striatal et un circuit-cortico-cérébelleux. Ces deux circuits sont eux-mêmes divisés en une partie langagière et une partie motrice. Le SAP cortico-striatal langage donne le Trouble spécifique du langage oral, tandis que la partie motricité donne le Trouble Développemental de la coordination. Le SAP cortico-cérébelleux donne, du côté langage, la dyslexie et/ou le TDA/H versant inattentif et du côté de la motricité, aucun trouble n'est identifié à ce jour.

Figure 15: Modèle de réunification des troubles neurodéveloppementaux selon un système d'atteinte de circuits neuronaux par

Nicolson et Fawcett 2007 (traduit)

D'après Ullman en 2000, les troubles spécifiques du langage sont un trouble de la mémoire procédurale plus que de la mémoire déclarative car les difficultés ne sont pas retrouvées au niveau du lexique en lui-même et donc du système déclaratif, mais plutôt au niveau de la grammaire, morphologie, phonologie et habiletés motrices qui relèveraient davantage du système procédural (Ullman, 2004). Les difficultés étant plutôt sur le versant de la production que de l'adaptation, il propose une atteinte du circuit langagier cortico-striatal.

Au contraire, la dyslexie ne serait pas un problème de production, mais d'adaptation phonologique et cela dépendrait plutôt du circuit langagier cortico-cérébelleux. Certains troubles du langage peuvent associer plus tard une dyslexie avec une atteinte de ce circuit.

Pour le TDC, l'atteinte se ferait au niveau du circuit moteur cortico-striatal car c'est avant tout un trouble de la production. Néanmoins, même si cela n'est pas proposé

dans leur modèle, nous pouvons nous interroger sur une atteinte également cortico-cérébelleuse vu que les TDC présentent des difficultés d'adaptation motrice (notamment en terme de force, de précision des mouvements) qui seraient plutôt de l'ordre du cervelet. Nicolson et Fawcett rajoutent que les dyspraxies verbales que l'on peut retrouver chez certains TDC notamment peuvent provenir d'une atteinte du circuit langagier cortico-striatal.

Enfin, en ce qui concerne le TDA, ils ont postulé une atteinte du circuit langagier corticocérébelleux sur la base d'une grande comorbidité avec la dyslexie. Ils proposent également que le TDA/H, donc cette fois avec hyperactivité, soit également un trouble du système d'apprentissage procédural avec potentiellement une troisième boucle exécutive corticostriatal. En effet, certaines études semblent montrer une atteinte des circuits frontauxstriataux-cérébelleux (Caoa et al., 2006; Dickstein et al., 2006).

Cette théorie sur l'étiologie commune des troubles neurodéveloppementaux au niveau d'un déficit du système d'apprentissage procédural est séduisante et ouvrirait d'ailleurs largement le champ d'action des psychomotriciens. Nous pourrions en effet tenter de réduire les troubles du langage et la dyslexie par une approche basée sur l'amélioration du système procédural. Toutefois elle ne fait pas l'unanimité et est remise en question par certains auteurs.

REMISE EN QUESTION DE LA THEORIE DU DEFICIT PROCEDURAL DANS LES TROUBLES NEURODEVELOPPEMENTAUX

West et collaborateurs (2018) remettent en question cette théorie en avançant plusieurs arguments. Tout d'abord, les résultats de déficit procédural chez les TSL et dyslexiques, notamment, sont inconstants, ne sont pas retrouvés dans l'ensemble des études menées. Il semblerait qu'il y ait d'ailleurs des dissociations de résultats en fonction des tâches utilisées pour mesurer les performances d'apprentissage procédural. Ils questionnent la validité des tests utilisés quant à leur mesure du système d'apprentissage procédural, se demandant si tous ces tests mesurent bien le même processus sous-jacent (West et al., 2018a). Ils ont donc mis en place une étude sur une large population d'enfants tout venants (n = 101) de 7 ans et demi à 8 ans 7 mois. Ces enfants ont réalisé une série de tâches mesurant la mémoire procédurale (SRTT, Hebb serial learning et contextual cueing tasks) et la mémoire déclarative

(rappel sériel immédiat et tâche de rappel libre) avec des stimuli verbaux et non-verbaux ainsi que des tâches de niveau en grammaire, épellation, correspondance mot-image, lecture, habiletés mathématiques et raisonnement non verbal.

Les résultats montrent un apprentissage procédural et déclaratif dans chacune des tâches. Mais après calcul de la fiabilité, les tâches procédurales montrent une faible fiabilité. De plus, leur corrélation entre elles et avec les « tâches de niveau » est très faible et non significative semblant indiquer qu'elles ne mesurent pas la même chose et que les résultats à ces tests n'ont pas de liens de causalité directe avec les résultats aux « tâches de niveau ». De ce fait, les auteurs mettent en doute que le déficit d'apprentissage procédural soit relié aux difficultés de langage. Il existe en effet des résultats montrant des difficultés procédurales chez des enfants aux troubles du langage mais ces études utiliseraient des groupes extrêmes (population très spécifique, sans comorbidités), auraient un nombre insuffisant de sujets ou de tâches, sans rapporter la fiabilité des mesures. Ils terminent en disant que pour l'heure il ne semble pas y avoir de relation entre l'apprentissage procédural et les capacités langagières mais que, comme les tests actuels manquent de fiabilité, il n'est pas réellement possible de conclure sur l'hypothèse du déficit procédural dans les troubles neurodéveloppementaux.

PROBLEMATIQUE

L'apprentissage procédural est donc complexe et englobe différentes habiletés à la fois motrices, cognitives et verbales. Il repose sur plusieurs vastes circuits cérébraux ayant des rôles distincts : un circuit cortico-striatal pour l'apprentissage de séquences motrices et un circuit cortico-cérébelleux pour l'adaptation motrice. De nombreuses tâches ont été développées afin d'évaluer cet apprentissage procédural et les systèmes neuronaux sous-jacents mais manqueraient peut-être pour certaines de validité et fiabilité. Ces tâches sont utilisées dans les paradigmes expérimentaux de recherche mais il n'existe, à notre connaissance, aucune tâche spécifique de l'apprentissage procédural utilisé en routine de bilan clinique. Nous avons de nombreuses tâches pour évaluer les fonctions exécutives, la motricité fine comme globale et même le système d'apprentissage déclaratif (qui ne nous concerne pas vraiment en psychomotricité)

mais aucune tâche n'évalue spécifiquement le processus d'apprentissage procédural. Les tâches évaluant la motricité s'intéressent à tester si une capacité/réalisation motrice est acquise ou non mais pas au processus qui permet cette acquisition. Cela est sans doute un manque pour notre profession pourtant spécialisée dans les troubles moteurs. De plus, de nombreux enfants présentent des difficultés procédurales qui impactent leurs performances et adaptation au quotidien pouvant entraîner un vrai désavantage social. Nous avons vu que ces difficultés procédurales pourraient concerner plus d'enfants que nous ne l'imaginions au premier abord avec notamment un déficit procédural dans les troubles du langage et la dyslexie.

C'est donc sur cette base de manque et d'incertitudes concernant le déficit procédural dans les pathologies de l'enfance que nous avons décidé de réaliser une revue systématique de la littérature s'intéressant à la présence ou non de trouble de l'apprentissage moteur dans l'ensemble troubles neurodéveloppementaux. Le but de cette revue est donc de répondre à deux questions :

- Quelles sont les troubles neurodéveloppementaux présentant des déficits d'apprentissage procéduraux ?
- Quels sont les facteurs qui influencent le déficit (caractéristiques personnelles et conditions d'apprentissage) ?

La réponse à ces questions nous guidera pour construire un outil d'évaluation de l'apprentissage procédural qui soit utilisable en clinique par tout professionnel psychomotricien.

L'apprentissage procédural étant un vaste sujet, nous avons décidé de nous focaliser sur l'apprentissage perceptivo-moteur séquentiel. L'apprentissage perceptivo-moteur nous semble en effet le domaine le plus relié à notre profession de psychomotricien. De plus, l'apprentissage de séquences motrices est plus largement étudié dans la littérature et présente des tâches expérimentales qui semblent tout à fait adaptable à la situation de bilan.

BIBLIOGRAPHIE

- American Psychiatric Association. (2015). *DSM-5 : Manuel Diagnostique et Statistique des Troubles Mentaux*.
- Anderson, J. R. (1982). Acquisition of Cognitive Skill. *Psychological Review*, 89(4), 369-406.
- Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1968). Human Memory : A Proposed System and its Control Processes. In K. W. Spence & J. T. Spence (Éds.), *Psychology of Learning and Motivation* (Vol. 2, p. 89 - 195). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S00797421\(08\)60422-3](https://doi.org/10.1016/S00797421(08)60422-3)
- Baddeley, A.D. (2000). The episodic buffer : A new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 417-423. [https://doi.org/10.1016/s1364-6613\(00\)01538-2](https://doi.org/10.1016/s1364-6613(00)01538-2)
- Baddeley, Alan D., & Hitch, G. (1974). Working Memory. In G. H. Bower (Éd.), *Psychology of Learning and Motivation* (Vol. 8, p. 47 - 89). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(08\)60452-1](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(08)60452-1)
- Baddeley, & Longman, D. J. A. (1978). The Influence of Length and Frequency of Training Session on the Rate of Learning to Type. *Ergonomics*, 21(8), 627 - 635. <https://doi.org/10.1080/00140137808931764>
- 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>
- Beaton, A. A. (2002). Dyslexia and the cerebellar deficit hypothesis. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 38(4), 479 - 490. [https://doi.org/10.1016/s0010-9452\(08\)70017-0](https://doi.org/10.1016/s0010-9452(08)70017-0)
- Beaunieux, H., Hubert, V., Witkowski, T., Pitel, A.-L., Rossi, S., Danion, J.-M., Desgranges, B., & Eustache, F. (2006). Which processes are involved in cognitive procedural learning? *Memory (Hove, England)*, 14(5), 521 - 539. <https://doi.org/10.1080/09658210500477766>
- Bernard, J. A., & Seidler, R. D. (2013). Cerebellar contributions to visuomotor adaptation and motor sequence learning : An ALE meta-analysis. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00027>
- Betancur, C. (2011). Etiological heterogeneity in autism spectrum disorders : More than 100 genetic and genomic disorders and still counting. *Brain Research*, 1380, 42-77. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2010.11.078>

- Bishop, D. V. (2002). Cerebellar Abnormalities in Developmental Dyslexia : Cause, Correlate or Consequence? *Cortex*, 38(4), 491 - 498. [https://doi.org/10.1016/S00109452\(08\)70018-2](https://doi.org/10.1016/S00109452(08)70018-2)
- Blais, M., Amarantini, D., Albaret, J.-M., Chaix, Y., & Tallet, J. (2018). Atypical interhemispheric 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>
- Brashers-Krug, T., Shadmehr, R., & Bizzi, E. (1996). Consolidation in human motor memory. *Nature*, 382(6588), 252-255. <https://doi.org/10.1038/382252a0>
- 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* (2006), 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)
- Caoa, Q., Zangb, Y., Suna, L., Suia, M., Longb, X., Zoub, Q., & Wanga, Y. (2006). Abnormal neural activity in children with attention deficit hyperactivity disorder : A resting-state functional magnetic resonance imaging study. *NeuroReport*.
- 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>
- Cherry, K. E., & Stadler, M. E. (1995). Implicit learning of a nonverbal sequence in younger and older adults. *Psychology and Aging*, 10(3), 379 - 394. <https://doi.org/10.1037/08827974.10.3.379>
- Clark, G. M., & Lum, J. A. G. (2016). First-order and higher order sequence learning in specific language impairment. *Neuropsychology*, 31(2), 149 - 159. <https://doi.org/10.1037/neu0000316>
- 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>
- Clark, G. M., Lum, J. A. G., & Ullman, M. T. (2014). A meta-analysis and meta-regression of serial reaction time task performance in Parkinson's disease. *Neuropsychology*, 28(6), 945-958. <https://doi.org/10.1037/neu0000121>

- Cohen, N. J., & Squire, L. R. (1980). Preserved learning and retention of pattern-analyzing skill in amnesia : Dissociation of knowing how and knowing that. *Science (New York, N.Y.)*, 210(4466), 207-210. <https://doi.org/10.1126/science.7414331>
- Conway, C. M., & Pisoni, D. B. (2008). Neurocognitive Basis of Implicit Learning of Sequential Structure and its Relation to Language Processing. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1145, 113-131. <https://doi.org/10.1196/annals.1416.009>
- Corraze, J. (2010). Psychomotricité : Histoire et validation d'un concept. *Regards sur la psychomotricité libanaise (2000-2010) : de la théorie à l'examen psychomoteur*.
- De Guise, E., & Lassonde, M. (2001). Callosal Contribution to Procedural Learning in Children. *Developmental Neuropsychology*, 19(3), 253 - 272. https://doi.org/10.1207/S15326942DN1903_2
- 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*. <https://doi.org/10.1177/0883073814560629>
- Deroost, N., Zeischka, P., Coomans, D., Bouazza, S., Depessemier, P., & Soetens, E. (2010). Intact first- and second-order implicit sequence learning in secondary-school-aged children with developmental dyslexia. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 32(6), 561-572. <https://doi.org/10.1080/13803390903313556>
- Desmottes, L., Meulemans, T., & Maillart, C. (2016a). Later learning stages in procedural memory are impaired in children with Specific Language Impairment. *Research in Developmental Disabilities*, 48, 53-68. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2015.10.010>
- Desmottes, L., Meulemans, T., & Maillart, C. (2016b). Implicit Spoken Words and Motor Sequences Learning Are Impaired in Children with Specific Language Impairment. *Journal of the International Neuropsychological Society: JINS*, 22(5), 520-529. <https://doi.org/10.1017/S135561771600028X>
- Desmottes, L., Meulemans, T., Patinec, M.-A., & Maillart, C. (2017). Distributed Training Enhances Implicit Sequence Acquisition in Children With Specific Language Impairment. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research: JSLHR*, 60(9), 2636-2647. https://doi.org/10.1044/2017_JSLHR-L-16-0146
- Deweert, B., Pillon, B., Michon, A., & Dubois, B. (1993). Mirror reading in Alzheimer's disease : Normal skill learning and acquisition of item-specific information. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 15(5), 789 - 804. <https://doi.org/10.1080/01688639308402596>
- Dickstein, S. G., Bannon, K., Xavier Castellanos, F., & Milham, M. P. (2006). The neural correlates of attention deficit hyperactivity disorder : An ALE meta-analysis. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 47(10), 1051-1062. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2006.01671.x>

- Donchin, O., Rabe, K., Diedrichsen, J., Lally, N., Schoch, B., Gizewski, E. R., & Timmann, D. (2012). Cerebellar regions involved in adaptation to force field and visuomotor perturbation. *Journal of Neurophysiology*, *107*(1), 134 - 147. <https://doi.org/10.1152/jn.00007.2011>
- Doyon, J., Bellec, P., Amsel, R., Penhune, V., Monchi, O., Carrier, J., Lehericy, S., & 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., & Benali, H. (2005). Reorganization and plasticity in the adult brain during learning of motor skills. *Current Opinion in Neurobiology*, *15*(2), 161 - 167. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2005.03.004>
- Doyon, J., Gabbitov, E., Vahdat, S., Lungu, O., & Boutin, A. (2017). Current issues related to motor sequence learning in humans. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *20*. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2017.11.012>
- Doyon, J., Penhune, V., & Ungerleider, L. (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)
- Dye, C. D., Walenski, M., Mostofsky, S. H., & Ullman, M. T. (2016). A verbal strength in children with Tourette syndrome? Evidence from a non-word repetition task. *Brain and Language*, *160*, 61-70. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2016.07.005>
- Ebbinghaus, H. (1885). Memory : A Contribution to Experimental Psychology. *Annals of Neurosciences*, *20*(4), 155-156. <https://doi.org/10.5214/ans.0972.7531.200408>
- Eichenbaum, H. (2000). A cortical-hippocampal system for declarative memory. *Nature Reviews. Neuroscience*, *1*(1), 41-50. <https://doi.org/10.1038/35036213>
- Ergorul, C., & Eichenbaum, H. (2006). Essential Role of the Hippocampal Formation in Rapid Learning of Higher-Order Sequential Associations. *Journal of Neuroscience*, *26*(15), 4111-4117. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0441-06.2006>
- Eustache, F., Viard, A., & Desgranges, B. (2016). The MNESIS model : Memory systems and processes, identity and future thinking. *Neuropsychologia*, *87*, 96 - 109. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2016.05.006>
- Fischer, S., Hallschmid, M., Elsner, A. L., & Born, J. (2002). Sleep forms memory for finger skills. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *99*(18), 11987-11991. <https://doi.org/10.1073/pnas.182178199>
- Foti, F., Crescenzo, F. D., Vivanti, G., Menghini, D., & Vicari, S. (2015). Implicit learning in individuals with autism spectrum disorders : A meta-analysis. *Psychological Medicine*, *45*(5), 897-910. <https://doi.org/10.1017/S0033291714001950>
- Gabriel, A., Maillart, C., Guillaume, M., Stefaniak, N., & Meulemans, T. (2011). Exploration of serial structure procedural learning in children with language impairment. *Journal*

of the International Neuropsychological Society: *JINS*, 17(2), 336 - 343. <https://doi.org/10.1017/S1355617710001724>

- 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: JINS*, 19(3), 264 -271. <https://doi.org/10.1017/S1355617712001270>
- Gabriel, A., Meulemans, T., Parisse, C., & Maillart, C. (2015). Procedural learning across modalities in French-speaking children with specific language impairment. *Applied Psycholinguistics*, 36(3), 747-769. <https://doi.org/10.1017/S0142716413000490>
- Gabriel, A., Stefaniak, N., Maillart, C., Schmitz, X., & Meulemans, T. (2012). Procedural visual learning in children with specific language impairment. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 21(4), 329 - 341. [https://doi.org/10.1044/10580360\(2012/11-0044\)](https://doi.org/10.1044/10580360(2012/11-0044))
- Gaillard, V., Destrebecqz, A., Michiels, S., & Cleeremans, A. (2009). Effects of age and practice in sequence learning : A graded account of ageing, learning, and control. *European Journal of Cognitive Psychology*, 21(2-3), 255 - 282. <https://doi.org/10.1080/09541440802257423>
- 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>
- Gómez-Beldarrain, M., García-Moncó, J. C., Rubio, B., & Pascual-Leone, A. (1998). Effect of focal cerebellar lesions on procedural learning in the serial reaction time task. *Experimental Brain Research*, 120(1), 25-30. <https://doi.org/10.1007/s002210050374>
- 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>
- Groves, P. M., & Thompson, R. F. (1970). Habituation : A dual-process theory. *Psychological Review*, 77(5), 419-450. <https://doi.org/10.1037/h0029810>
- Hauptmann, B., & Karni, A. (2002). From primed to learn : The saturation of repetition priming and the induction of long-term memory. *Cognitive Brain Research*, 13(3), 313-322. [https://doi.org/10.1016/S0926-6410\(01\)00124-0](https://doi.org/10.1016/S0926-6410(01)00124-0)
- Hazeltine, E., Grafton, S. T., & Ivry, R. (1997). Attention and stimulus characteristics determine the locus of motor-sequence encoding. A PET study. *Brain: A Journal of Neurology*, 120 (Pt 1), 123-140. <https://doi.org/10.1093/brain/120.1.123>
- He, X., & Tong, S. X. (2017). Quantity Matters : Children With Dyslexia Are Impaired in a Small, but Not Large, Number of Exposures During Implicit Repeated Sequence Learning. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 26(4), 1080-1091. https://doi.org/10.1044/2017_AJSLP-15-0190
- Hedenius, M., Persson, J., Alm, P. A., Ullman, M. T., Howard, J. H., Howard, D. V., & Jennische, M. (2013). Impaired implicit sequence learning in children with

- developmental dyslexia. *Research in Developmental Disabilities*, 34(11), 3924-3935. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.08.014>
- Hedenius, M., Persson, J., Tremblay, A., Adi-Japha, E., Veríssimo, J., Dye, C. D., Alm, P., Jennische, M., Tomblin, J. B., & 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>
- Howard Jr., J. H., & Howard, D. V. (1997). Age differences in implicit learning of higher order dependencies in serial patterns. *Psychology and Aging*, 12(4), 634 - 656. <https://doi.org/10.1037/0882-7974.12.4.634>
- Hsu, H. J., & Bishop, D. V. (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>
- Izadi-Najafabadi, S., Mirzakhani-Araghi, N., Miri-Lavasani, N., Nejati, V., & PashazadehAzari, 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 : Agerelated Differences in Implicit Sequence Learning across Human Life Span. *Developmental Science*, 15(4), 496 - 505. <https://doi.org/10.1111/j.14677687.2012.01150.x>
- Jiménez-Fernández, G., Vaquero, J. M. M., Jiménez, L., & Defior, S. (2011). Dyslexic children show deficits in implicit sequence learning, but not in explicit sequence learning or contextual cueing. *Annals of Dyslexia*, 61(1), 85-110. <https://doi.org/10.1007/s11881-010-0048-3>
- 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>
- Karni, A., Meyer, G., Jezzard, P., Adams, M. M., Turner, R., & Ungerleider, L. G. (1995). Functional MRI evidence for adult motor cortex plasticity during motor skill learning. *Nature*, 377(6545), 155-158. <https://doi.org/10.1038/377155a0>
- Karni, A., & Sagi, D. (1991). Where practice makes perfect in texture discrimination : Evidence for primary visual cortex plasticity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 88(11), 4966-4970.
- Kleynen, M., Braun, S. M., Rasquin, S. M. C., Bleijlevens, M. H. C., Lexis, M. A. S., Halfens, J., Wilson, M. R., Masters, R. S. W., & 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>

- Knowlton, B. J., Squire, L. R., & Gluck, M. A. (1994). Probabilistic classification learning in amnesia. *Learning & Memory*, *1*(2), 106-120. <https://doi.org/10.1101/lm.1.2.106>
- 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>
- Liberati, A., Altman, D. G., Tetzlaff, J., Mulrow, C., Gøtzsche, P. C., Ioannidis, J. P. A., Clarke, M., Devereaux, P. J., Kleijnen, J., & Moher, D. (2009). The PRISMA Statement for Reporting Systematic Reviews and Meta-Analyses of Studies That Evaluate Health Care Interventions : Explanation and Elaboration. *PLoS Medicine*, *6*(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000100>
- Loftus, E. F. (2005). Planting misinformation in the human mind : A 30-year investigation of the malleability of memory. *Learning & Memory*, *12*(4), 361 - 366. <https://doi.org/10.1101/lm.94705>
- Loftus, E. F., & Palmer, J. C. (1974). Reconstruction of automobile destruction : An example of the interaction between language and memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *13*(5), 585-589. [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(74\)80011-3](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(74)80011-3)
- Lukács, A., & 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; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, *51*(100), 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; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, *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>
- Martin, T. A., Keating, J. G., Goodkin, H. P., Bastian, A. J., & Thach, W. T. (1996). Throwing while looking through prisms. I. Focal olivocerebellar lesions impair adaptation. *Brain*:

- A Journal of Neurology*, 119 (Pt 4), 1183 - 1198.
<https://doi.org/10.1093/brain/119.4.1183>
- Mayor-Dubois, C., Zesiger, P., Van der Linden, M., & Roulet-Perez, E. (2014). Nondeclarative learning in children with specific language impairment : Predicting regularities in the visuomotor, phonological, and cognitive domains. *Child Neuropsychology: A Journal on Normal and Abnormal Development in Childhood and Adolescence*, 20(1), 14-22.
<https://doi.org/10.1080/09297049.2012.734293>
- McGaugh, J. L. (2000). Memory—A Century of Consolidation. *Science*, 287(5451), 248-251.
<https://doi.org/10.1126/science.287.5451.248>
- 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., Finzi, A., Benassi, M., Bolzani, R., Facoetti, A., Giovagnoli, S., Ruffino, M., & Vicari, S. (2010). Different underlying neurocognitive deficits in developmental dyslexia : A comparative study. *Neuropsychologia*, 48(4), 863-872.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.11.003>
- Meulemans, T., Van der Linden, M., & Perruchet, P. (1998). Implicit Sequence Learning in Children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 69(3), 199 - 221.
<https://doi.org/10.1006/jecp.1998.2442>
- 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)
- 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: JINS*, 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, 47. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-10-47>
- 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., Jambori, S., Danyi, I., & 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., Brookes, R. L., & Needle, J. (2010). Procedural learning and dyslexia. *Dyslexia (Chichester, England)*, 16(3), 194 - 212. <https://doi.org/10.1002/dys.408>
- Nicolson, Roderick 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>
- 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>
- Packard, M. G., & Knowlton, B. J. (2002). Learning and memory functions of the Basal Ganglia. *Annual Review of Neuroscience*, 25, 563-593. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.25.112701.142937>
- 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: JSLHR*, 61(3), 634 - 644. https://doi.org/10.1044/2017_JSLHR-L-16-0409
- Peigneux, P., Maquet, P., Meulemans, T., Destrebecqz, A., Laureys, S., Degueldre, C., Delfiore, G., Aerts, J., Luxen, A., Franck, G., Van der Linden, M., & Cleeremans, A. (2000). Striatum forever, despite sequence learning variability : A random effect analysis of PET data. *Human Brain Mapping*, 10(4), 179 - 194. [https://doi.org/10.1002/1097-0193\(200008\)10:4<179::AID-HBM30>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/1097-0193(200008)10:4<179::AID-HBM30>3.0.CO;2-H)
- Prehn-Kristensen, A., Molzow, I., Munz, M., Wilhelm, I., Müller, K., Freytag, D., Wiesner, C. D., & Baving, L. (2011). Sleep restores daytime deficits in procedural memory in children with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Research in Developmental Disabilities*, 32(6), 2480-2488. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.06.021>
- 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; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 65, 102 - 112. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.01.005>
- Sanes, J. N., 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>

- 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>
- Shallice. (1982). Specific impairments of planning. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 11*.
- Smyth, M. M. (1975). The Role of Mental Practice in Skill Acquisition. *Journal of Motor Behavior, 7*(3), 199-206. <https://doi.org/10.1080/00222895.1975.10735034>
- Soliveri, P., Brown, R. G., Jahanshahi, T., Caraceni, T., & Marsden, C. D. (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>
- 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>
- Staels, E., & Van den Broeck, W. (2017). A specific implicit sequence learning deficit as an underlying cause of dyslexia? Investigating the role of attention in implicit learning tasks. *Neuropsychology, 31*(4), 371-382. <https://doi.org/10.1037/neu0000348>
- Stoodley, C. J., Ray, N. J., Jack, A., & Stein, J. F. (2008). Implicit Learning in Control, Dyslexic, and Garden-Variety Poor Readers. *Annals of the New York Academy of Sciences, 1145*(1), 173-183. <https://doi.org/10.1196/annals.1416.003>
- Takács, Á., Kóbor, A., Chezán, J., Éltető, N., Tárnok, Z., Nemeth, D., Ullman, M. T., & Janáček, 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., Janáček, K., Kóbor, A., Tremblay, A., Németh, D., & 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., 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>
- Thomas, K., & Nelson, C. (2001). Serial Reaction Time Learning in Preschool- and School-Age Children. *Journal of Experimental Child Psychology, 79*(4), 364 - 387. <https://doi.org/10.1006/jecp.2000.2613>
- Tolman, E. C., & Honzik, C. H. (1930a). Degrees of hunger, reward and non-reward, and maze learning in rats. *University of California Publications in Psychology, 4*, 241-256.
- Tolman, E. C., & Honzik, C. H. (1930b). Introduction and removal of reward, and maze performance in rats. *University of California Publications in Psychology, 4*, 257-275.
- 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>
- Tricco, A., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K., Colquhoun, H., Levac, D., Moher, D., Peters, M., Horsley, T., Weeks, L., Hempel, S., Akl, E., Chang, C., McGowan, J., Stewart, L., Hartling, L., Aldcroft, A., Wilson, M., Garritty, C., & Straus, S. (2018). PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): Checklist and explanation. *Annals of Internal Medicine*, 169. <https://doi.org/10.7326/M18-0850>
- Tulving, E. (1972). Episodic and semantic memory. *New York Academic Press*, 382-402.
- Tulving E. Episodic and semantic memory. (Tulving E & Donaldson W, eds.) Organization of memory. New York : Academic Press. 1972. P. 381-403. (s. d.). 1.*
- Ullman, M. T. (2004). Contributions of memory circuits to language: The declarative/procedural model. *Cognition*, 92(1 - 2), 231 - 270. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2003.10.008>
- Vahdat, S., Lungu, O., Cohen-Adad, J., Marchand-Pauvert, V., Benali, H., & Doyon, J. (2015). Simultaneous Brain–Cervical Cord fMRI Reveals Intrinsic Spinal Cord Plasticity during Motor Sequence Learning. *PLOS Biology*, 13(6), e1002186. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002186>
- Vakil, E., Lowe, M., & Goldfus, C. (2015). Performance of Children With Developmental Dyslexia on Two Skill Learning Tasks-Serial Reaction Time and Tower of Hanoi Puzzle : A Test of the Specific Procedural Learning Difficulties Theory. *Journal of Learning Disabilities*, 48(5), 471-481. <https://doi.org/10.1177/0022219413508981>
- 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>
- Vicari, S, Finzi, A., Menghini, D., Marotta, L., Baldi, S., & Petrosini, L. (2005). Do children with developmental dyslexia have an implicit learning deficit? *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 76(10), 1392 - 1397. <https://doi.org/10.1136/jnnp.2004.061093>
- Vicari, Stefano, 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)
- Vogel, D., & Dussutour, A. (2016). Direct transfer of learned behaviour via cell fusion in nonneural organisms. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283(1845), 20162382. <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.2382>
- Wagner, U., Gais, S., Haider, H., Verleger, R., & Born, J. (2004). Sleep inspires insight. *Nature*, 427(6972), 352-355. <https://doi.org/10.1038/nature02223>
- Walenski, M., Mostofsky, S. H., & Ullman, M. T. (2007). Speeded Processing of Grammar and Tool Knowledge in Tourette's Syndrome. *Neuropsychologia*, 45(11), 2447–2460.

- West, G., Clayton, F. J., Shanks, D. R., & Hulme, C. (2019). Procedural and declarative learning in dyslexia. *Dyslexia (Chichester, England)*, 25(3), 246 - 255. <https://doi.org/10.1002/dys.1615>
- West, G., Vadillo, M. A., Shanks, D. R., & Hulme, C. (2018a). The procedural learning deficit hypothesis of language learning disorders : We see some problems. *Developmental Science*, 21(2). <https://doi.org/10.1111/desc.12552>
- West, G., Vadillo, M. A., Shanks, D. R., & Hulme, C. (2018b). The procedural learning deficit hypothesis of language learning disorders : We see some problems. *Developmental Science*, 21(2). <https://doi.org/10.1111/desc.12552>
- Wilson, P. H., Maruff, P., & Lum, J. (2003). Procedural learning in children with developmental coordination disorder. *Human Movement Science*, 22(4), 515 - 526. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2003.09.007>
- Wilson, P., Smits-Engelsman, B., Caeyenberghs, K., Steenbergen, B., Sugden, D., Clark, J., Mumford, N., & Blank, R. (2017). Cognitive and neuroimaging findings in Developmental Coordination Disorder : New insights from a systematic review of recent research. *Developmental Medicine & Child Neurology*, in press. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13530>
- Yang, Y., Bi, H.-Y., Long, Z.-Y., & Tao, S. (2013). Evidence for cerebellar dysfunction in Chinese children with developmental dyslexia : An fMRI study. *International Journal of Neuroscience*, 123(5), 300-310. <https://doi.org/10.3109/00207454.2012.756484>
- Yang, Y., & Hong-Yan, B. (2011). Unilateral implicit motor learning deficit in developmental dyslexia. *International Journal of Psychology: Journal International De Psychologie*, 46(1), 1-8. <https://doi.org/10.1080/00207594.2010.509800>
- Zwart, F. S., Vissers, C. Th. 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>

RESUME

L'apprentissage moteur est un des domaines de compétence du psychomotricien et pourtant il n'existe, à ce jour, aucun test clinique l'évaluant. Etant un vaste domaine, nous nous sommes focalisés sur l'apprentissage procédural perceptivo-moteur séquentiel. Afin de construire, par la suite, un outil d'évaluation de cet apprentissage, il était nécessaire de mettre en lumière quels étaient les troubles neurodéveloppementaux qui en présentaient un déficit et quels étaient les facteurs (caractéristiques personnelles et conditions d'apprentissage) qui pouvaient influencer ce déficit. Pour répondre à ces interrogations, nous avons mené une analyse systématique de la littérature. Nos résultats indiquent une préservation du processus dans le SGT, le TDA/H, le TSA et le TDC à l'aide d'une tâche de SRTT (Serial Reaction Time Task) ou équivalente. Les résultats pour la Dyslexie et le TSL suggèrent eux, une altération de cet apprentissage. Les conditions associées à la tâche semblent parfois affecter les performances.

Ces résultats nous permettent de proposer qu'une adaptation de la tâche de SRTT (en fonction des caractéristiques ayant une influence sur les performances) pourrait être un outil clinique d'évaluation de l'apprentissage perceptivo-moteur séquentiel pour les psychomotriciens. Les performances à cette tâche leur donnerait de nouvelles informations quant aux capacités d'apprentissage procédural et les guiderait dans la mise en place des prises en charge.

Mots clés : SRTT ; Apprentissage procédural perceptivo-moteur séquentiel ; Outil d'évaluation

Psychomotrician are competent in motor learning however, today, there isn't any clinical test assessing this learning. As it's a large domain, we focused on sequential perceptual-motor procedural learning. Before building an assessment tool, it was necessary to highlight which neurodevelopmental disorder was deficient and which factors (personnal characteristics and learning conditions) could influence this deficit. To answer those questions, we led a Systematic Review. Our results show a preservation of procedural learning in Tourette Syndrome, ADHD, ASD and DCD with a SRTT (Serial Reaction Time Task) or ASRT (Alternating Serial Reaction Time). Results for Dyslexia and SLI suggest a learning alteration. Task's conditions seem to affect performances. These results allow us to propose that an adapted SRTT (according to the characteristics having an influence on performances) could be a sequential perceptual-motor procedural learning clinical assessment tool for psychomotricians. Performances would give them new informations about the procedural learning capacities and would guide them in the psychomotor care.

Key words : SRTT; Sequential perceptual-motor procedural learning; Assessment tool