**L'hypothèse du déficit procédural : apport pour la compréhension du Trouble
Développemental du Langage, sa spécificité et ses comorbidités**

Elodie Juvené¹, Nathalie Thomas^{1,2}, Alec Aeby¹, Charline Urbain^{3,4}

¹Département de Neuropédiatrie, Hôpital Universitaire des Enfants Reine Fabiola
(HUDERF), Université Libre de Bruxelles (ULB), Bruxelles, Belgique

²Laboratoire Cognition, Langage et Développement (LCLD), Centre de Recherche en
Cognition et Neurosciences (CRCN), ULB-Neurosciences Institute (UNI), ULB, Bruxelles,
Belgique

³Laboratoire de Cartographie Fonctionnelle du Cerveau (LCFC), UNI, ULB, Bruxelles,
Belgique

⁴Unité de recherches en Neuropsychologie et Neuroimagerie Fonctionnelle (UR2NF), CRCN
et UNI, ULB, Bruxelles, Belgique

Note des auteurs

Les auteurs n'ont pas de conflit d'intérêt.

La correspondance concernant cet article est à adresser à Elodie Juvené, Département de Neuropédiatrie, Hôpital Universitaire des Enfants Reine Fabiola (HUDERF), Avenue J.J. Crocq 20, 1020 Bruxelles, Belgique. Email : elodie.juvene@huderf.be

Adresses des auteurs : Nathalie Thomas, Département de Neuropédiatrie, Hôpital Universitaire des Enfants Reine Fabiola (HUDERF), Avenue J.J. Crocq 20, 1020 Bruxelles, Belgique. Email : nathalie.thomas@huderf.be

Alec Aeby, Département de Neuropédiatrie, Hôpital Universitaire des Enfants Reine Fabiola (HUDERF), Avenue J.J. Crocq 20, 1020 Bruxelles, Belgique. Email : alec.aeby@huderf.be

Charline Urbain, UR2NF [Unité de Recherches en Neuropsychologie et Neuroimagerie Fonctionnelle]. ULB-Faculté des Sciences Psychologiques, Campus du Solbosch, CP191, avenue F.D. Roosevelt 50, 1050 Bruxelles. E-mail : charline.urbain@ulb.be

Titre court : Déficit procédural et trouble développemental du langage

L'hypothèse du déficit procédural : apport pour la compréhension du Trouble**Développemental du Langage, sa spécificité et ses comorbidités****Abstract (en français)**

Un ensemble d'études menées au cours de ces 15 dernières années montrent des performances d'apprentissage procédural altérées dans le Trouble Développemental du Langage (TDL). Bien que des résultats contradictoires soient parfois rapportés, l'hypothèse du déficit procédural dans le TDL est prometteuse car elle offre une meilleure compréhension des profils de comorbidités complexes fréquemment observés chez ces patients. Dans ce contexte, un certain nombre de données suggèrent qu'un dysfonctionnement des circuits cérébraux soutenant la mémoire procédurale puisse également expliquer une partie des difficultés observées dans des troubles fréquemment associés au TDL, tels que le Trouble Développemental de la Coordination (TDC) ou le Trouble Spécifique des Apprentissages (TSAp) avec déficit en lecture. Ici aussi, des résultats contradictoires appellent à poursuivre ces recherches. Enfin, plusieurs études suggèrent que les patients avec un TDL ou un TSAp en lecture compensent une partie de leurs difficultés langagières ou procédurales au moyen de connaissances et stratégies cognitives dépendantes de la mémoire déclarative. Cette hypothèse pourrait non seulement améliorer la prise en charge de ces patients, mais également, ouvrir de nouvelles pistes d'interventions thérapeutiques à d'autres troubles neurodéveloppementaux.

Mots clé : Trouble Développemental du Langage, hypothèse du déficit procédural, processus d'apprentissage et de consolidation en mémoire, mécanismes de compensation en mémoire déclarative.

The procedural deficit hypothesis : implication for the understanding of Developmental Language Disorder (DLD), its specificity and comorbidities

Abstract (in english)

Accumulated evidences show atypical procedural learning performance in Developmental Language Disorder (DLD) over the past 15 years. Although contradictory results are sometimes reported, the procedural deficit hypothesis is promising as it offers a better understanding of the complex comorbidity patterns frequently observed in DLD. In that line, several studies have suggested that an atypical functioning of the cerebral networks underlying procedural memory may also explain some of the difficulties observed in disorders frequently associated with DLD, such as Developmental Coordination Disorder (DCD) or Specific Learning Disorder (SLD) with impairment in reading. Here also, contradictory results call for further research. Finally, several studies suggest that patients with DLD or SLD with impairment in reading compensate for their language or procedural learning difficulties through declarative memory dependent knowledge or cognitive strategies. This hypothesis could not only improve clinical care in these patients but also open up new avenues of therapeutic interventions to other neurodevelopmental disorders.

Keywords : Developmental Language Disorder, Procedural deficit hypothesis, learning and memory consolidation processes, compensatory mechanisms in declarative memory.

1. Introduction

Notre compréhension du Trouble Développemental du Langage (TDL) a beaucoup évolué au cours de ces 15 dernières années ainsi que les classifications et terminologies associées. Les définitions questionnant la nature de la spécificité du TDL passant progressivement d'une atteinte spécifique du développement langagier à une compréhension moins modulaire de ces difficultés (Bishop et al., 2017). Dans ce cadre, une hypothèse ayant suscité beaucoup d'engouement propose qu'une partie importante des difficultés langagières et non langagières des enfants avec un TDL puisse être expliquée par une atteinte spécifique des réseaux cérébraux qui sous-tendent la mémoire procédurale (Ullman & Pierpont, 2005). Cette hypothèse a été récemment élargie à la compréhension d'autres troubles neurodéveloppementaux (voir Krishnan et al., 2016 ; Ullman et al., 2020).

2. L'hypothèse du déficit d'apprentissage procédural

La mémoire procédurale se définit comme un sous-système de la mémoire non déclarative permettant l'apprentissage et l'automatisation au cours du temps, et à travers une exposition répétée, d'habiletés motrices, visuo-motrices ou cognitives (p. ex., rouler à vélo, jouer d'un instrument de musique ou aux échecs) (Henke, 2010 ; Packard & Knowlton, 2002 ; Simor et al., 2019 ; Squire & Zola, 1996). Par ailleurs, la mémoire procédurale participe à l'apprentissage de séquences nécessaires au développement de fonctions cognitives de haut niveau (Cohen & Bacdayan, 1994 ; Seger, 2006) telles que le langage (Ullman, 2001, 2004 ; voir section 3 pour plus de détails).

L'hypothèse selon laquelle le TDL pourrait être en grande partie expliqué par une atteinte du système de la mémoire procédurale a pour la première fois été proposée par Ullman et Pierpont en 2005. Dans cet article de revue, les auteurs proposent qu'un développement atypique des régions cérébrales qui sous-tendent la mémoire procédurale, et en particulier l'apprentissage de

séquences complexes, puisse expliquer les difficultés langagières (p. ex., sur le plan de la phonologie et/ou de la morpho-syntaxe) et non langagières (p. ex., sur le plan moteur, de la mémoire de travail ou du traitement temporel rapide) des enfants avec un TDL.

Au cours des 15 dernières années, de nombreuses études comportementales ont investigué cette hypothèse. Dans leur grande majorité, ces recherches ont évalué les habiletés d'apprentissage de séquences de participants avec un TDL, en comparaison à leurs pairs au développement typique (DT) au moyen de versions adaptées de la tâche de Temps de Réaction Sériel (TRS ; Nissen & Bullemer, 1987 ; voir figure 1 ci-dessous ; voir aussi Janacsek et al., 2020).

<INSERER LA FIGURE 1 ICI >

Les résultats révèlent dans l'ensemble une altération des capacités d'apprentissage procédural des patients avec un TDL. Plus précisément, un nombre important d'études identifient des habiletés d'apprentissage de séquences plus faibles (Conti-Ramsden et al., 2015 ; Desmottes et al., 2016a ; Earle & Ullman, 2021 ; Gabriel et al., 2013 ; Kuppuraj et al., 2016 ; Lum et al., 2010 ; Sengottuvel & Rao, 2013) ou plus lentes ou moins précises (voir expérience 1, Gabriel et al., 2012 ; mais voir aussi expérience 2, Gabriel et al., 2012 ; Hsu & Bishop, 2014 ; Sanjeevan & Mainela-Arnold, 2017 ; Tomblin et al., 2007) chez l'enfant, l'adolescent ou l'adulte avec un TDL en comparaison à des pairs au DT. Il a également été suggéré que l'altération de la mémoire procédurale affecte spécifiquement l'apprentissage de régularités séquentielles chez ces patients. En effet, quelques études rapportent une préservation des performances d'enfants avec un TDL dans le cadre d'apprentissages procéduraux n'impliquant pas de traitement séquentiel (p. ex., tâche de dessin en miroir ou tâche de poursuite rotative) (Hsu & Bishop, 2014 ; Desmottes et al., 2017b ; Sanjeevan & Mainela-Arnold, 2017). Par ailleurs, en accord

avec l'hypothèse de Ullman et Pierpont (2005), les difficultés d'apprentissage de séquences de patients avec un TDL ne semblent pas uniquement s'observer sur le plan moteur ou visuo-moteur. En effet, des études rapportent des habiletés d'apprentissage de séquences de stimuli auditifs non linguistiques (tonalités) moins précises chez les enfants avec un TDL en comparaison à leurs pairs au DT (Gabriel et al., 2015) ainsi que des performances altérées d'apprentissage de séquences de stimuli linguistiques (items lexicaux) chez ces patients (Desmottes et al., 2016b ; Hsu & Bishop, 2014).

La plupart des études investiguant les performances d'apprentissage procédural dans les groupes au DT montrent une association entre les habiletés d'apprentissage de séquences visuo-motrices et les habiletés linguistiques (traitement grammatical) de ces participants. Toutefois, ces profils d'associations ne semblent pas s'observer dans les groupes de participants avec un TDL (Conti-Ramsden et al., 2015 ; Desmottes et al., 2016a, 2016b ; Lum et al., 2012). Certaines études rapportent de surcroît une association entre les habiletés grammaticales de ces patients et leurs capacités d'apprentissage déclaratif (Conti-Ramsden et al., 2015 ; Lum et al., 2012). Ces profils d'association particuliers suggèrent qu'une part importante des difficultés grammaticales de ces patients puisse être compensée par la mémoire déclarative à défaut d'être soutenue par la mémoire procédurale (voir section 6 pour plus de détails).

Enfin, il a été suggéré que les difficultés d'apprentissage procédural des patients avec un TDL puissent être davantage associées à un développement immature, et non déviant, des réseaux cérébraux qui sous-tendent la mémoire procédurale. En effet, Hsu et Bishop (2014) rapportent que les performances d'apprentissage de séquences (dans ce cas, linguistiques) des enfants avec un TDL ne se différencient plus de celles d'enfants contrôles, plus jeunes, mais présentant des habiletés grammaticales de même niveau (appariés sur base des habiletés morpho-syntaxiques en réception).

Dans l'ensemble, ces études tendent à confirmer l'hypothèse d'un déficit d'apprentissage procédural dans le TDL telle qu'initialement proposée par Ullman et Pierpont en 2005. Toutefois, les résultats de la littérature, mêmes s'ils semblent probants, restent à nuancer. En effet, d'une part, certaines données montrent la présence d'une préservation des habiletés d'apprentissage de séquences dans les premières étapes d'acquisition (voir p. ex., Gabriel et al., 2012 ; Desmottes et al., 2016a, 2017a) et, d'autre part, de nombreux auteurs s'accordent sur le fait qu'un ensemble de facteurs « tâche-dépendants » pourraient impacter les habiletés d'apprentissage de séquences des patients TDL ; parmi ceux-ci : la complexité de la séquence en jeu (Gabriel et al., 2013), la durée d'exposition à celle-ci (Lum et al., 2014 ; Desmottes et al., 2016a) ou encore le type de tâche utilisée (Aguilar & Plante, 2014 ; Gabriel et al., 2012, 2015 ; voir aussi West et al., 2018 ; Conway et al., 2019 pour une réflexion à ce niveau). Enfin, il a été suggéré que les difficultés d'apprentissage de séquences des patients avec un TDL s'observent particulièrement dans les jeunes populations (Lum et al., 2014).

3. Le modèle déclaratif/procédural : importance des réseaux cérébraux de la mémoire pour l'acquisition du langage

L'hypothèse d'un déficit procédural dans le TDL se base sur le modèle déclaratif/procédural développé par M. T. Ullman en 2001 et 2004. Il suggère que les processus d'apprentissage, de stockage et de traitement du langage dépendent de réseaux cérébraux similaires à ceux qui sous-tendent la mémoire déclarative et procédurale (Ullman, 2001, 2004). En particulier, selon le modèle déclaratif/procédural, les réseaux cérébraux impliqués dans les processus de mémoire déclarative (permettant l'acquisition de connaissances arbitraires, sémantiques ou épisodiques à propos de faits ou d'évènements), sous-tendent également l'apprentissage et le stockage de certaines informations linguistiques. Par exemple, le modèle propose que les connaissances à propos des mots et de leur signification (lexico-sémantiques), ainsi que les formes irrégulières des verbes, soient stockées en mémoire déclarative et donc sous-tendues par les réseaux

cérébraux lui étant associés (Ullman, 2001, 2004). Ces réseaux cérébraux impliquent en grande partie les régions hippocampiques situées au sein du lobe temporal médian, elles-mêmes en interaction avec d'autres structures cérébrales telles que le cortex préfrontal et temporo-pariétal (Cabeza & Moscovitch, 2013 ; Eichenbaum et al., 2012 ; Henke, 2010 ; Hitti & Siegelbaum, 2014 ; Lee et al., 2020 ; Squire, 2004 ; Ullman, 2004).

En parallèle, le modèle déclaratif/procédural propose que les réseaux cérébraux impliqués dans les processus d'apprentissage en mémoire procédurale puissent également sous-tendre l'apprentissage des régularités séquentielles nécessaires au développement langagier (Ullman, 2001, 2004). Par exemple, le modèle propose que l'apprentissage et le traitement de régularités sur le plan phonologique (p. ex., règles phonotactiques) ou morpho-syntaxique (p. ex., flexion des verbes et ordre des mots dans la phrase) (Conti-Ramsden et al., 2015 ; Ullman, 2004 ; Ullman & Pierpont, 2005) soient supportés par les réseaux cérébraux soutenant les apprentissages en mémoire procédurale (Ullman, 2001, 2004). Sur le plan neuroanatomique, ces processus d'apprentissage dépendraient de plusieurs réseaux impliquant notamment certaines portions des régions (pré)frontales (dont l'aire Broca), pariétales, les noyaux de la base (striatum) et le cervelet (Henke, 2010 ; Lee et al., 2020 ; Middleton & Strick, 2000 ; Packard & Knowlton, 2002 ; Pigdon et al., 2019 ; Ullman 2001, 2004 ; Ullman et al., 2020).

Il est, toutefois, important de noter que les structures cérébrales soutenant les apprentissages déclaratifs et procéduraux semblent partiellement se recouvrir. En effet, des études menées en IRM fonctionnelle ont permis d'identifier l'implication de structures cérébrales du lobe temporal médian et, en particulier, de l'hippocampe, dans le contexte de certaines tâches d'apprentissage procédural de séquences visuo-motrices (Albouy et al., 2008 ; Schendan et al., 2003). Par ailleurs, la nature nécessairement inconsciente de la mémoire procédurale a été remise en question par des études montrant l'implication d'un ensemble de processus contrôlés dans les premières étapes d'apprentissage (Beaunieux et al., 2006). Ces observations ont permis

un abandon progressif de la distinction des grands systèmes mnésiques déclaratif et procédural sur base de la nature consciente (explicite) ou inconsciente (implicite) des représentations associées (pour une revue de ces aspects voir Henke, 2010).

4. Apport de l'étude des réseaux cérébraux soutenant la mémoire procédurale pour la compréhension du Trouble Développementale du Langage et de ses comorbidités

L'hypothèse d'un déficit procédural dans le TDL propose qu'un développement atypique des réseaux cérébraux soutenant la mémoire procédurale, permette d'expliquer une part importante des difficultés langagières et non langagières de ces patients. Si des anomalies au niveau des régions frontales (Broca), des ganglions de la base (noyau caudé) et de la région péricallienne (symétrie atypique) avaient été initialement rapportées dans le TDL (Gauger et al., 1997 ; Jernigan et al., 1991 ; Leonard et al., 2002, 2006 ; Plante et al., 1991 ; Soriano-Mas et al., 2009), peu d'études se sont depuis concentrées sur l'analyse des propriétés structurelles du cerveau de ces patients. Toutefois, des recherches récentes suggèrent une anomalie du volume de matière grise au sein de la région postcentrale droite (Girbau-Massana et al., 2014), de l'hémisphère cérébelleux droit (Pigdon et al., 2019), ainsi que des anomalies de la microstructure de la substance blanche au sein des circuits cortico-striés et cortico-cérébelleux et de la région temporo-médiale (Lee et al., 2020) chez ces patients.

En accord avec l'hypothèse du déficit procédural, une partie de ces anomalies structurelles pourrait expliquer certaines comorbidités fréquemment associées au TDL (Ullman et al., 2020 ; Ullman & Pierpont, 2005). En particulier, il a été suggéré qu'une atteinte à des degrés divers des réseaux fronto-striato-cérébelleux puisse expliquer les difficultés observées chez ces patients au niveau de la coordination motrice, de la mémoire de travail ou encore la fréquente co-occurrence du TDL avec un Trouble Développementale de la Coordination (TDC) ou des Troubles Spécifiques d'Apprentissage (TSAp) (Evans & Ullman, 2016 ; Krishnan et al., 2016 ; Ullman & Pierpont, 2005 ; Vukovic et al., 2010).

Dans la lignée de ces arguments, un certain nombre d'observations neurophysiologiques et/ou cliniques suggèrent la présence d'une altération des réseaux cérébraux soutenant la mémoire procédurale chez les patients avec un TDC ou avec un TSApp (Bo & Leen, 2013 ; Evans & Ullman, 2016 ; Huijsmans et al., 2020 ; Krishnan et al., 2016 ; Rapin, 2016 ; Ullman et al., 2020). Plus précisément, des études suggèrent que le TDC, caractérisé par un développement atypique des habiletés de coordination motrice (American Psychiatric Association, 2013), puisse être en partie associé à un dysfonctionnement de certaines structures (p. ex., cervelet, noyaux de la base ou encore cortex pariétal) en lien avec l'apprentissage de séquences perceptivo-motrices (Biotteau et al., 2016 ; Bo & Leen, 2013). Sur le plan clinique, les difficultés d'automatisation de séquences motrices de ces patients suggèrent également un déficit d'apprentissage procédural dans le TDC (Leonard et al., 2015). Toutefois, les données obtenues sur le plan comportemental (au moyen de tâches de TRS ou de tâches perceptivo-motrices) restent à ce jour contradictoires. En effet, les études rapportent tantôt la présence (Gheysen et al., 2011 ; Van Dyck et al., under review) tantôt l'absence (Lejeune et al., 2013, 2016 ; Opitz et al., 2020 ; Wilson et al., 2003) de performances réduites d'apprentissage de séquences chez ces patients.

De la même manière, il a également été suggéré qu'une partie des difficultés des patients avec un TSApp en lecture puisse être expliquée par un fonctionnement atypique des structures cérébrales soutenant les apprentissages procéduraux (pour deux revues concernant ces aspects voir Lum et al., 2013 ; Krishnan, et al., 2016). En accord avec cette hypothèse, plusieurs études rapportent la présence d'anomalies au niveau du cervelet (Brambati et al., 2004; Kronbichler et al., 2008 ; voir aussi Nicolson & Fawcett 2007, 2011 ; Pernet et al., 2009), des noyaux de la base (Eckert et al., 2005) et de plusieurs régions motrices (Silani et al., 2005) chez ces patients. Au niveau comportemental, des performances réduites d'apprentissage de séquences ont été fréquemment rapportées dans le TSApp en lecture, notamment au moyen de tâches de type TRS

(voir Lum et al., 2013 pour une méta-analyse) ou dans le contexte d'autres tâches (Henderson & Warmington 2017 ; Kahta & Schiff, 2016; Pavlidou & Williams, 2010). Cependant, on note la présence de résultats contradictoires, un nombre important d'études rapportant également des habiletés d'apprentissage séquentiel préservées chez les patients avec TSAp en lecture en comparaison à leurs pairs au DT (pour une revue de ces aspects, voir Stoodley et al., 2008 ; Henderson & Warmington 2017). Ici encore, l'hétérogénéité des résultats semble liée à la variabilité des caractéristiques méthodologiques propres aux études, notamment au niveau des populations étudiées (âge, comorbidités, etc.) ou des tâches d'apprentissage utilisées (Lum et al., 2013 ; Henderson & Warmington, 2017).

Enfin, il a également été proposé que les difficultés d'automatisation des habiletés mathématiques fréquemment observées chez les enfants porteurs d'un TSAp avec déficit en calcul puissent être, elles aussi, liées à un déficit d'apprentissage procédural (Evans & Ullman, 2016). Cependant, à notre connaissance, cette hypothèse n'a actuellement pas été spécifiquement testée sur le plan neurophysiologique ou comportemental.

En synthèse, si la présence de difficultés d'apprentissage procédural apparaît relativement avérée chez les patients avec un TDL, celles-ci restent controversées ou à démontrer dans le cadre du TSAp en lecture, en calcul ou du TDC. Toutefois poursuivre ces recherches s'avère crucial tant pour améliorer notre compréhension des déficits (neurophysiologiques et comportementaux) propres à chacun de ces troubles mais également pour mieux comprendre la nature des difficultés partagées entre ces troubles et leur fréquente cooccurrence sur le plan clinique (Bishop & Snowling, 2004 ; Bo & Leen, 2013 ; Clark & Lum, 2017 ; Evans & Ullman, 2016 ; Finlay & McPhillips, 2013 ; Haberstroh & Schulte-Körne, 2019 ; Rapin, 2016 ; Vukovic et al., 2010).

5. *Importance de considérer la dynamique des apprentissages et les processus de consolidation en mémoire*

Lorsque l'enfant acquiert de nouvelles connaissances ou habiletés en mémoire, celles-ci ne sont pas d'emblée stockées de façon permanente. Après l'apprentissage, les informations vont continuer d'être traitées/renforcées au cours de périodes successives dites de *consolidation offline* (c.-à-d. en l'absence d'une réexposition ou de pratique du matériel appris). En effet, à ce jour, de nombreuses études démontrent un rôle actif des périodes de veille ou de sommeil sur le renforcement des apprentissages grâce à l'intégration progressive des nouvelles informations au sein des réseaux cérébraux de la mémoire à long terme (Peigneux et al., 2004, 2006 ; Urbain et al., 2016 ; pour des revues, voir aussi Born & Wilhelm, 2012 ; Tambini & Davachi, 2019).

Sur le plan de la mémoire procédurale, de nombreuses études menées chez l'adulte montrent qu'une simple pause (allant de quelques minutes à plusieurs heures) permet de consolider (c.-à-d. de stabiliser ou d'améliorer) les performances d'apprentissage de séquences motrices ou visuo-motrices des participants (Cohen & Robertson, 2007 ; Doyon & Benali, 2005 ; Press et al., 2005 ; voir aussi Robertson & Cohen, 2006). Un phénomène qui est d'autant plus important après un épisode de sommeil (Brawn et al., 2010 ; Fischer et al., 2002 ; Hotermans et al., 2008 ; King et al., 2017 ; Rasch & Born, 2013 ; Robertson et al., 2004 ; Walker et al., 2002). Chez l'enfant au DT, les études montrent un impact similaire (Dorfberger et al., 2007) voir renforcé par rapport à l'adulte (Ashtamker & Karni, 2013) des périodes de veille *offline* sur le renforcement (c.-à-d. la consolidation) de la mémoire procédurale. Toutefois, l'impact spécifique d'une période de sommeil sur la consolidation des apprentissages procéduraux chez l'enfant est moins clair (Astill et al., 2014 ; Ashtamker & Karni, 2013 ; Desrochers et al., 2016 ; Urbain et al., 2014 ; Wilhelm et al., 2008).

Ces dernières années, quelques études ont également mis en évidence l'impact positif des processus de consolidation, notamment ceux en jeu au cours du sommeil, sur les apprentissages langagiers (pour des revues, voir Gómez et al., 2011 ; Schreiner & Rasch, 2017), notamment au niveau des processus d'intégration lexicale (Gaskell & Dumay, 2003) de généralisation de régularités importantes pour l'acquisition du langage (Gómez et al., 2006) ou de la discrimination des sons de la parole (Earle & Myers, 2015 ; Qin & Zhang, 2019).

Les études susmentionnées mettent en évidence le rôle crucial des périodes de veille et/ou de sommeil sur la consolidation des informations en mémoire et l'importance de considérer le caractère dynamique des processus d'apprentissage. Dans le contexte de l'évaluation des apprentissages de patients avec un TDL, il convient donc de tenir compte du fait que la performance obtenue à la fin d'une séance d'entraînement ne reflète pas nécessairement le niveau de performance mesuré quelques heures ou quelques jours plus tard (Hedenius et al., 2011 ; Gabay et al., 2012).

A ce jour, seule une poignée d'études comportementales se sont intéressées à l'impact des périodes de consolidation offline sur la rétention des apprentissages en mémoire procédurale dans le cadre du TDL. Les résultats de ces études convergent et tendent à montrer qu'en plus de présenter des difficultés au niveau des phases initiales de l'apprentissage procédural (voir section 2, ci-dessus), les patients avec un TDL semblent également présenter une altération des processus de consolidation de ces apprentissages. En effet, les études montrent des performances de consolidation en mémoire procédurale plus faibles chez les enfants avec un TDL en comparaison à leurs pairs au DT chez qui l'on observe une stabilisation ou une amélioration des performances lors d'un re-test des habiletés visuo-motrices (tâche de type TRS) ou grapho-motrices (production de symboles complexes) après 24h ou plusieurs jours (Adi-Japha et al., 2011 ; Adi-Japha & Abu-Asba, 2014 ; Desmottes et al., 2016a , 2017a ; Hedenius, et al., 2011). Des constats similaires ont été récemment observés auprès d'une

population d'enfants avec TSApp en lecture au moyen de tâches de TRS (Hedenius et al., 2013a , 2021).

6. L'hypothèse d'une compensation en mémoire déclarative

Dans l'ensemble, les recherches menées au cours de ces dernières années soutiennent l'hypothèse d'un déficit d'apprentissage procédural dans le TDL. La spécificité de cette atteinte est également renforcée par le constat d'une relative préservation des performances en mémoire déclarative chez ces patients (Ullman & Pullman, 2015). En effet, un certain nombre d'études rapportent des performances d'apprentissage déclaratif similaires entre des enfants avec un TDL et leurs pairs au DT appariés et ce, dans le cadre de tâches déclaratives non verbales (Bishop & Hsu, 2015 ; Kuppuraj et al., 2016 ; Lum et al., 2010) ou de tâches déclaratives verbales, pour peu que la mémoire de travail soit contrôlée (Lum et al., 2012 ; Lum & Conti-Ramsden, 2013 ; Lum et al., 2015 ; Bishop & Hsu, 2015 ; Lum et al., 2010). Par ailleurs, une poignée d'études rapportent également des processus de consolidation en mémoire déclarative intacts dans le TDL (Bishop & Hsu, 2015 ; Lukács et al., 2017 ; mais voir Earle & Ullman, 2021), tout comme dans le cadre du TSApp en lecture (Hedenius et al., 2013b ; Kibby, 2009 ; Kibby & Cohen, 2008 mais voir Reda et al., 2021 et Smith et al., 2018).

Bien que les arguments empiriques soient encore peu nombreux, ces résultats vont dans le sens des modèles théoriques (Ullman & Pierpont, 2005 ; Krishnan et al., 2016) suggérant une atteinte spécifique des réseaux cérébraux qui sous-tendent la mémoire procédurale et une relative préservation du système de mémoire déclarative chez ces patients. Toutefois, l'étude des mécanismes d'apprentissage préservés dans des population d'enfants au développement atypique est assez récente. L'analyse des atouts cognitifs de patients TDL ou en situation de TSApp en lecture pourrait pourtant œuvrer à l'amélioration de leur prise en charge. En effet, l'observation clinique de ces patients et les résultats d'une poignée d'études comportementales et neurophysiologiques suggèrent que les connaissances et les habiletés d'apprentissage en

mémoire déclarative observées dans le TDL et le TSApp en lecture puissent compenser les difficultés de ces patients (Ullman et al., 2020 ; Ullman & Pullman, 2015). Par exemple, l'observation clinique de patients avec un TDL suggère que certains processus de traitements phonologiques (p. ex., régularités phonotactiques) ou morpho-syntaxiques (p. ex., accord en nombre) puissent être réalisés, non pas sur base de stratégies d'apprentissage procédural (via l'extraction et l'automatisation de régularités séquentielles du langage), mais sur base de stratégies déclaratives explicites (p. ex., apprendre explicitement que l'on doit dire « ils boivent » au pluriel mais « il boit » au singulier) (Ullman & Pullman, 2015).

En accord avec cette hypothèse, plusieurs études montrent la présence d'une association entre les habiletés d'apprentissage procédural (apprentissage de séquences verbales et/ou visuo-motrices) et les performances morpho-syntaxiques chez les enfants au DT alors que celles-ci sont par ailleurs associées aux performances en mémoire déclarative chez les enfants avec un TDL (Conti-Ramsden et al., 2015 ; Desmottes et al., 2016a, 2016b ; Lum et al., 2012). De plus, une étude réalisée chez des adultes avec TSApp en lecture montre une normalisation (comparativement aux participants contrôles) des performances d'apprentissage de séquences lorsque la règle sous-jacente au matériel d'apprentissage leur était annoncée explicitement (Kahta & Schiff, 2016). Enfin, deux études menées sur le plan électro-physiologique au moyen d'analyses de potentiels évoqués soutiennent également l'hypothèse d'une compensation des difficultés observées dans le TDL via la mémoire déclarative (Fonteneau & van der Lely, 2008 ; Neville et al., 1993). Parmi celles-ci, l'étude de Fonteneau et van der Lely (2008) montre que la confrontation à des erreurs syntaxiques au sein de phrases s'accompagne d'une réponse évoquée de type négativité antérieure gauche (ELAN, Early Left Anterior Negativity), caractéristique du traitement automatique de structures syntaxiques dans le groupe contrôle alors que ce type d'association ne s'observait pas dans le groupe avec un TDL. Chez ces derniers, la confrontation à des erreurs syntaxiques était associée à une réponse évoquée de type

N400 (Negativity 400), une composante électrophysiologique reliée au traitement d'informations lexico-sémantiques et à la mémoire déclarative (Kutas & Federmeier, 2011 ; McCarthy et al., 1995 ; Mormann et al., 2005). Ces résultats suggèrent donc que les patients avec un TDL auraient recours à des stratégies déclaratives et non procédurales pour soutenir, voire compenser, leurs difficultés sur le plan morpho-syntaxique. De manière intéressante, des observations neurophysiologiques similaires ont été rapportées chez de jeunes adultes avec un TSaP en lecture (Cantiani et al., 2013) et l'hypothèse d'une compensation de difficultés cognitives et langagières via la mémoire déclarative a été étendue à d'autres troubles neurodéveloppementaux (pour plus de détails voir Ullman et al., 2020 ; Ullman & Pullman, 2015). Toutefois, à ce jour, les études doivent être poursuivies pour améliorer notre compréhension des mécanismes de compensation dans le cadre de ces populations cliniques.

7. Synthèse et conclusions

La terminologie utilisée pour qualifier le TDL a évolué drastiquement au cours de ces dernières années et avec elle notre compréhension de la nature des difficultés lui étant associées. Si le TDL était au départ envisagé comme un trouble spécifique du langage, les informations cliniques, empiriques et théoriques rapportées au cours de ces 15 dernières années nous ont progressivement écarté d'une compréhension modulaire de ce trouble. Dans ce contexte, les chercheurs ont notamment proposé qu'une partie importante des difficultés langagières et non langagières des enfants avec un TDL puisse être expliquée par une atteinte spécifique des réseaux cérébraux qui sous-tendent la mémoire procédurale. Dans l'ensemble, les données de la littérature tendent à valider cette hypothèse. En effet, bien qu'un certain nombre de facteurs semblent moduler l'ampleur de ces effets, une majorité d'études rapportent des habiletés en mémoire procédurale atypiques chez les patients avec un TDL (au niveau de l'apprentissage et/ou des phases de consolidation associées). De manière cruciale, ces difficultés d'apprentissage procédural dans le TDL permettent de mieux comprendre la présence d'un

certain nombre de difficultés langagières mais également les profils de comorbidités complexes fréquemment observés chez ces patients. En effet, certaines études ou modèles théoriques suggèrent que des anomalies similaires soient à l'origine des difficultés observées dans d'autres troubles tels que le TDC ou le TSApp en lecture. Toutefois, les études restent peu nombreuses et contradictoires. Par conséquent, davantage d'études comportementales mais également électrophysiologiques ou de neuroimagerie doivent être menées afin de préciser la nature des anomalies du réseau fronto-striato-cérébelleux soutenant les habiletés procédurales chez ces patients. Enfin, les études rapportées dans ce chapitre suggérant une relative préservation des apprentissages en mémoire déclarative et leur potentiel rôle dans la compensation des difficultés langagières des patients avec un TDL et un TSApp en lecture, sont prometteuses. En effet, poursuivre la recherche en ce sens devrait non seulement permettre d'améliorer la prise en charge de ces patients mais également d'étendre ces nouvelles pistes d'interventions thérapeutiques à d'autres troubles neurodéveloppementaux.

8. *Références*

- Adi-Japha, E., & Abu-Asba, H. (2014). Learning, forgetting, and relearning: skill learning in children with language impairment. *American journal of speech-language pathology*, 23(4), 696–707. https://doi.org/10.1044/2014_AJSLP-13-0031
- Adi-Japha, E., Strulovich-Schwartz, O., & Julius, M. (2011). Delayed motor skill acquisition in kindergarten children with language impairment. *Research in developmental disabilities*, 32(6), 2963–2971. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.05.005>
- Aguilar, J. M., & Plante, E. (2014). Learning of grammar-like visual sequences by adults with and without language-learning disabilities. *Journal of speech, language, and hearing research : JSLHR*, 57(4), 1394–1404. https://doi.org/10.1044/2014_JSLHR-L-13-0124
- Albouy, G., Sterpenich, V., Balet, E., Vandewalle, G., Desseilles, M., Dang-Vu, T., Darsaud, A., Ruby, P., Luppi, P. H., Degueldre, C., Peigneux, P., Luxen, A., & Maquet, P. (2008). Both the hippocampus and striatum are involved in consolidation of motor sequence memory. *Neuron*, 58(2), 261–272. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2008.02.008>
- American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders* (5th ed.). <https://doi.org/10.1176/appi.books.9780890425596>
- Ashtamker, L., & Karni, A. (2013). Motor memory in childhood: early expression of consolidation phase gains. *Neurobiology of learning and memory*, 106, 26–30. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2013.07.003>
- Astill, R. G., Piantoni, G., Raymann, R. J., Vis, J. C., Coppens, J. E., Walker, M. P., Stickgold, R., Van Der Werf, Y. D., & Van Someren, E. J. (2014). Sleep spindle and slow wave frequency reflect motor skill performance in primary school-age children. *Frontiers in human neuroscience*, 8, 910. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00910>

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>

Biotteau, M., Chaix, Y., Blais, M., Tallet, J., Péran, P., & Albaret, J. M. (2016). Neural Signature of DCD: A Critical Review of MRI Neuroimaging Studies. *Frontiers in neurology*, 7, 227. <https://doi.org/10.3389/fneur.2016.00227>

Bishop, D. V., & Hsu, H. J. (2015). The declarative system in children with specific language impairment: a comparison of meaningful and meaningless auditory-visual paired associate learning. *BMC psychology*, 3(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s40359-015-0062-7>

Bishop, D. V., & Snowling, M. J. (2004). Developmental dyslexia and specific language impairment: same or different?. *Psychological bulletin*, 130(6), 858–886.

<https://doi.org/10.1037/0033-2909.130.6.858>

Bishop, D., Snowling, M. J., Thompson, P. A., Greenhalgh, T., & and the CATALISE-2 consortium (2017). Phase 2 of CATALISE: a multinational and multidisciplinary Delphi consensus study of problems with language development: Terminology. *Journal of child psychology and psychiatry, and allied disciplines*, 58(10), 1068–1080.

<https://doi.org/10.1111/jcpp.12721>

Bo, J., & Lee, C. M. (2013). Motor skill learning in children with Developmental Coordination Disorder. *Research in developmental disabilities*, 34(6), 2047–2055.

<https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.03.012>

Born, J., & Wilhelm, I. (2012). System consolidation of memory during sleep. *Psychological research*, 76(2), 192–203. <https://doi.org/10.1007/s00426-011-0335-6>

Brambati, S. M., Termine, C., Ruffino, M., Stella, G., Fazio, F., Cappa, S. F., & Perani, D. (2004). Regional reductions of gray matter volume in familial dyslexia. *Neurology*, 63(4), 742–745. <https://doi.org/10.1212/01.wnl.0000134673.95020.ee>

Brawn, T. P., Fenn, K. M., Nusbaum, H. C., & Margoliash, D. (2010). Consolidating the effects of waking and sleep on motor-sequence learning. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 30(42), 13977–13982.

<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3295-10.2010>

Cabeza, R., & Moscovitch, M. (2013). Memory Systems, Processing Modes, and Components: Functional Neuroimaging Evidence. *Perspectives on psychological science : a journal of the Association for Psychological Science*, 8(1), 49–55.

<https://doi.org/10.1177/1745691612469033>

Cantiani, C., Lorusso, M., Perego, P., Molteni, M., & Guasti, M. (2013). Event-related potentials reveal anomalous morphosyntactic processing in developmental dyslexia. *Applied Psycholinguistics*, 34(6), 1135–1162. <https://doi.org/10.1017/S0142716412000185>

Clark, G. M., & Lum, J. A. (2017). 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>

Cohen, M. D., & Bacdayan, P. (1994). Organizational Routines Are Stored As Procedural Memory: Evidence from a Laboratory Study. *Organization Science*, 5(4), 554–568.

<https://doi.org/10.1287/orsc.5.4.554>

Cohen, D. A., & Robertson, E. M. (2007). Motor sequence consolidation: constrained by critical time windows or competing components. *Experimental brain research*, 177(4), 440–446. <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0701-6>

Conway, C. M., Arciuli, J., Lum, J., & Ullman, M. T. (2019). Seeing problems that may not exist: A reply to West et al.'s (2018) questioning of the procedural deficit hypothesis.

Developmental science, 22(4), e12814. <https://doi.org/10.1111/desc.12814>

Conti-Ramsden, G., Ullman, M. T., & Lum, J. A. (2015). The relation between receptive grammar and procedural, declarative, and working memory in specific language impairment.

Frontiers in psychology, 6, 1090. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01090>

Desmottes, L., Maillart, C., & Meulemans, T. (2017a). Memory consolidation in children with specific language impairment: Delayed gains and susceptibility to interference in implicit sequence learning. Journal of clinical and experimental neuropsychology, 39(3), 265–

285. <https://doi.org/10.1080/13803395.2016.1223279>

Desmottes, L., Maillart, C., & Meulemans, T. (2017b). Mirror-drawing skill in children with specific language impairment: Improving generalization by incorporating variability into the practice session. Child neuropsychology : a journal on normal and abnormal development in childhood and adolescence, 23(4), 463–482. <https://doi.org/10.1080/09297049.2016.1170797>

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>

Desrochers, P. C., Kurdziel, L. B., & Spencer, R. M. (2016). Delayed benefit of naps on motor learning in preschool children. Experimental brain research, 234(3), 763–772.

<https://doi.org/10.1007/s00221-015-4506-3>

Dorfberger, S., Adi-Japha, E., & Karni, A. (2007). Reduced susceptibility to interference in the consolidation of motor memory before adolescence. *PloS one*, 2(2), e240.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000240>

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>

Earle, F. S., & Myers, E. B. (2015). Overnight consolidation promotes generalization across talkers in the identification of nonnative speech sounds. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(1), EL91–EL97. <https://doi.org/10.1121/1.4903918>

Earle, F. S., & Ullman, M. T. (2021). Deficits of Learning in Procedural Memory and Consolidation in Declarative Memory in Adults With Developmental Language Disorder. *Journal of speech, language, and hearing research : JSLHR*, 64(2), 531–541.

https://doi.org/10.1044/2020_JSLHR-20-00292

Eckert, M. A., Leonard, C. M., Wilke, M., Eckert, M., Richards, T., Richards, A., & Berninger, V. (2005). Anatomical signatures of dyslexia in children: unique information from manual and voxel based morphometry brain measures. *Cortex; a journal devoted to the study of the nervous system and behavior*, 41(3), 304–315. [https://doi.org/10.1016/s0010-9452\(08\)70268-5](https://doi.org/10.1016/s0010-9452(08)70268-5)

Eichenbaum, H., Sauvage, M., Fortin, N., Komorowski, R., & Lipton, P. (2012). Towards a functional organization of episodic memory in the medial temporal lobe. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 36(7), 1597–1608. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.07.006>

Evans, T. M., & Ullman, M. T. (2016). An Extension of the Procedural Deficit Hypothesis from Developmental Language Disorders to Mathematical Disability. *Frontiers in psychology*, 7, 1318. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01318>

Finlay, J. C., & McPhillips, M. (2013). Comorbid motor deficits in a clinical sample of children with specific language impairment. *Research in developmental disabilities*, 34(9), 2533–2542. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.05.015>

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>

Fonteneau, E., & van der Lely, H. K. (2008). Electrical brain responses in language-impaired children reveal grammar-specific deficits. *PloS one*, 3(3), e1832.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001832>

Gabay, Y., Schiff, R., & Vakil, E. (2012). Dissociation between the procedural learning of letter names and motor sequences in developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, 50(10), 2435–2441. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.06.014>

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/10.1044/1058-0360\(2012/11-0044\)](https://doi.org/10.1044/1058-0360(2012/11-0044))

Gaskell, M. G., & Dumay, N. (2003). Lexical competition and the acquisition of novel words. *Cognition*, 89(2), 105–132. [https://doi.org/10.1016/s0010-0277\(03\)00070-2](https://doi.org/10.1016/s0010-0277(03)00070-2)

Gauger, L. M., Lombardino, L. J., & Leonard, C. M. (1997). Brain morphology in children with specific language impairment. *Journal of speech, language, and hearing research : JSLHR*, 40(6), 1272–1284. <https://doi.org/10.1044/jslhr.4006.1272>

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>

Girbau-Massana, D., Garcia-Marti, G., Marti-Bonmati, L., & Schwartz, R. G. (2014). Gray-white matter and cerebrospinal fluid volume differences in children with Specific Language Impairment and/or Reading Disability. *Neuropsychologia*, 56, 90–100. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.01.004>

Gómez, R. L., Bootzin, R. R., & Nadel, L. (2006). Naps promote abstraction in language-learning infants. *Psychological Science*, 17(8), 670–674. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01764.x>

Gómez, R. L., Newman-Smith, K. C., Breslin, J. H., & Bootzin, R. R. (2011). Learning, memory, and sleep in children. *Sleep Medicine Clinics*, 6(1), 45–57. <https://doi.org/10.1016/j.jsmc.2010.12.002>

Haberstroh, S., & Schulte-Körne, G. (2019). The Diagnosis and Treatment of Dyscalculia. *Deutsches Arzteblatt international*, 116(7), 107–114. <https://doi.org/10.3238/arztebl.2019.0107>

Hedenius, M., Lum, J., & Bölte, S. (2021). Alterations of procedural memory consolidation in children with developmental dyslexia. *Neuropsychology*, 35(2), 185–196. <https://doi.org/10.1037/neu0000708>

Hedenius, M., Persson, J., Tremblay, A., Adi-Japha, E., Veríssimo, J., Dye, C. D., Alm, P., Jennische, M., Bruce Tomblin, J., & 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>

Hedenius, M., Persson, J., Alm, P. A., Ullman, M. T., Howard, J. H., Jr, Howard, D. V., & Jennische, M. (2013a). 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., Ullman, M. T., Alm, P., Jennische, M., & Persson, J. (2013b). Enhanced recognition memory after incidental encoding in children with developmental dyslexia. *PloS one*, 8(5), e63998. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0063998>

Henderson, L. M., & Warmington, M. (2017). A sequence learning impairment in dyslexia? It depends on the task. *Research in developmental disabilities*, 60, 198–210. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2016.11.002>

Henke K. (2010). A model for memory systems based on processing modes rather than consciousness. *Nature reviews. Neuroscience*, 11(7), 523–532. <https://doi.org/10.1038/nrn2850>

Hitti, F. L., & Siegelbaum, S. A. (2014). The hippocampal CA2 region is essential for social memory. *Nature*, 508(7494), 88–92. <https://doi.org/10.1038/nature13028>

Hotermans, C., Peigneux, P., de Noordhout, A. M., Moonen, G., & Maquet, P. (2008). Repetitive transcranial magnetic stimulation over the primary motor cortex disrupts early boost but not delayed gains in performance in motor sequence learning. *The European journal of neuroscience*, 28(6), 1216–1221. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2008.06421.x>

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>

Huijsmans, M., Kleemans, T., van der Ven, S., & Kroesbergen, E. H. (2020). The relevance of subtyping children with mathematical learning disabilities. *Research in developmental disabilities*, 104, 103704. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2020.103704>

Janacsek, K., Shattuck, K. F., Tagarelli, K. M., Lum, J., Turkeltaub, P. E., & Ullman, M. T. (2020). Sequence learning in the human brain: A functional neuroanatomical meta-analysis of serial reaction time studies. *NeuroImage*, 207, 116387.

<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116387>

Jernigan, T. L., Hesselink, J. R., Sowell, E., & Tallal, P. A. (1991). Cerebral structure on magnetic resonance imaging in language- and learning-impaired children. *Archives of neurology*, 48(5), 539–545. <https://doi.org/10.1001/archneur.1991.00530170103028>

Kahta, S., & Schiff, R. (2016). Implicit learning deficits among adults with developmental dyslexia. *Annals of dyslexia*, 66(2), 235–250. <https://doi.org/10.1007/s11881-016-0121-7>

Kibby M. Y. (2009). Memory functioning in developmental dyslexia: an analysis using two clinical memory measures. *Archives of clinical neuropsychology : the official journal of the National Academy of Neuropsychologists*, 24(3), 245–254.

<https://doi.org/10.1093/arclin/acp028>

Kibby, M. Y., & Cohen, M. J. (2008). Memory functioning in children with reading disabilities and/or attention deficit/hyperactivity disorder: a clinical investigation of their working memory and long-term memory functioning. *Child neuropsychology : a journal on normal and abnormal development in childhood and adolescence*, 14(6), 525–546.

<https://doi.org/10.1080/09297040701821752>

King, B. R., Hoedlmoser, K., Hirschauer, F., Dolfen, N., & Albouy, G. (2017). Sleeping on the motor engram: The multifaceted nature of sleep-related motor memory consolidation.

Neuroscience and biobehavioral reviews, 80, 1–22.

<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.04.026>

Krishnan, S., Watkins, K. E., & Bishop, D. (2016). Neurobiological Basis of Language Learning Difficulties. *Trends in cognitive sciences*, 20(9), 701–714.

<https://doi.org/10.1016/j.tics.2016.06.012>

Kronbichler, M., Wimmer, H., Staffen, W., Hutzler, F., Mair, A., & Ladurner, G. (2008). Developmental dyslexia: gray matter abnormalities in the occipitotemporal cortex. *Human brain mapping*, 29(5), 613–625. <https://doi.org/10.1002/hbm.20425>

Kuppuraj, S., Rao, P., & Bishop, D. V. (2016). Declarative capacity does not trade-off with procedural capacity in children with specific language impairment. *Autism & Developmental Language Impairments*. <https://doi.org/10.1177/2396941516674416>

Kutas, M., & Federmeier, K. D. (2011). Thirty years and counting: finding meaning in the N400 component of the event-related brain potential (ERP). *Annual review of psychology*, 62, 621–647. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.093008.131123>

Lee, J. C., Nopoulos, P. C., & Tomblin, J. B. (2020). Procedural and declarative memory brain systems in developmental language disorder (DLD). *Brain and language*, 205, 104789. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2020.104789>

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>

Lejeune, C., Wansard, M., Geurten, M., & Meulemans, T. (2016). Procedural learning, consolidation, and transfer of a new skill in Developmental Coordination Disorder. *Child neuropsychology : a journal on normal and abnormal development in childhood and adolescence*, 22(2), 143–154. <https://doi.org/10.1080/09297049.2014.988608>

Leonard, H. C., Bernardi, M., Hill, E. L., & Henry, L. A. (2015). Executive Functioning, Motor Difficulties, and Developmental Coordination Disorder. *Developmental neuropsychology*, 40(4), 201–215. <https://doi.org/10.1080/87565641.2014.997933>

Leonard, C., Eckert, M., Given, B., Virginia, B., & Eden, G. (2006). Individual differences in anatomy predict reading and oral language impairments in children. *Brain : a journal of neurology*, 129(Pt 12), 3329–3342. <https://doi.org/10.1093/brain/awl262>

Leonard, C. M., Lombardino, L. J., Walsh, K., Eckert, M. A., Mockler, J. L., Rowe, L. A., Williams, S., & DeBose, C. B. (2002). Anatomical risk factors that distinguish dyslexia from SLI predict reading skill in normal children. *Journal of communication disorders*, 35(6), 501–531. [https://doi.org/10.1016/s0021-9924\(02\)00120-x](https://doi.org/10.1016/s0021-9924(02)00120-x)

Lukács, Á., Kemény, F., Lum, J. A., & Ullman, M. T. (2017). Learning and Overnight Retention in Declarative Memory in Specific Language Impairment. *PloS one*, 12(1), e0169474. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169474>

Lum, J. A., & Conti-Ramsden, G. (2013). Long-term memory: A review and meta-analysis of studies of declarative and procedural memory in specific language impairment. *Topics in language disorders*, 33(4), 282–297. <https://doi.org/10.1097/01.tld.0000437939.01237.6a>

Lum, J. A., 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., 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., 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., 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>

Lum, J. A., Ullman, M. T., & Conti-Ramsden, G. (2015). Verbal declarative memory impairments in specific language impairment are related to working memory deficits. *Brain and language*, 142, 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2015.01.008>

McCarthy, G., Nobre, A. C., Bentin, S., & Spencer, D. D. (1995). Language-related field potentials in the anterior-medial temporal lobe: I. Intracranial distribution and neural generators. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 15(2), 1080–1089. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.15-02-01080.1995>

Middleton, F. A., & Strick, P. L. (2000). Basal ganglia and cerebellar loops: motor and cognitive circuits. *Brain research. Brain research reviews*, 31(2-3), 236–250. [https://doi.org/10.1016/s0165-0173\(99\)00040-5](https://doi.org/10.1016/s0165-0173(99)00040-5)

Mormann, F., Fell, J., Axmacher, N., Weber, B., Lehnertz, K., Elger, C. E., & Fernández, G. (2005). Phase/amplitude reset and theta-gamma interaction in the human medial temporal lobe during a continuous word recognition memory task. *Hippocampus*, 15(7), 890–900. <https://doi.org/10.1002/hipo.20117>

Neville, H. J., Coffey, S. A., Holcomb, P. J., & Tallal, P. (1993). The neurobiology of sensory and language processing in language-impaired children. *Journal of cognitive neuroscience*, 5(2), 235–253. <https://doi.org/10.1162/jocn.1993.5.2.235>

Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (2007). Procedural learning difficulties: reuniting the developmental disorders?. *Trends in neurosciences*, 30(4), 135–141.

<https://doi.org/10.1016/j.tins.2007.02.003>

Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (2011). Dyslexia, dysgraphia, procedural learning and the cerebellum. *Cortex; a journal devoted to the study of the nervous system and behavior*, 47(1), 117–127. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2009.08.016>

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)

Opitz, B., Brady, D., & Leonard, H. C. (2020). Motor and non-motor sequence prediction is equally affected in children with developmental coordination disorder. *PloS one*, 15(11), e0232562. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232562>

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>

Pavlidou, E. V., Williams, J. M. (2010). Developmental dyslexia and implicit learning: evidence from an AGL transfer study. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2(2), 3289-3296. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.03.503>

Peigneux, P., Laureys, S., Fuchs, S., Collette, F., Perrin, F., Reggers, J., Phillips, C., Degueldre, C., Del Fiore, G., Aerts, J., Luxen, A., & Maquet, P. (2004). Are spatial memories strengthened in the human hippocampus during slow wave sleep?. *Neuron*, 44(3), 535–545. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2004.10.007>

Peigneux, P., Orban, P., Balteau, E., Degueldre, C., Luxen, A., Laureys, S., & Maquet, P. (2006). Offline persistence of memory-related cerebral activity during active wakefulness.

PLoS biology, 4(4), e100. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0040100>

Pernet, C. R., Poline, J. B., Demonet, J. F., & Rousselet, G. A. (2009). Brain classification reveals the right cerebellum as the best biomarker of dyslexia. BMC neuroscience, 10, 67.

<https://doi.org/10.1186/1471-2202-10-67>

Pigdon, L., Willmott, C., Reilly, S., Conti-Ramsden, G., Gaser, C., Connelly, A., & Morgan, A. T. (2019). Grey matter volume in developmental speech and language disorder. Brain structure & function, 224(9), 3387–3398. <https://doi.org/10.1007/s00429-019-01978-7>

Plante, E., Swisher, L., Vance, R., & Rapcsak, S. (1991). MRI findings in boys with specific language impairment. Brain and language, 41(1), 52–66. [https://doi.org/10.1016/0093-934x\(91\)90110-m](https://doi.org/10.1016/0093-934x(91)90110-m)

Press, D. Z., Casement, M. D., Pascual-Leone, A., & Robertson, E. M. (2005). The time course of off-line motor sequence learning. Brain research. Cognitive brain research, 25(1), 375–378. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2005.05.010>

Qin, Z., & Zhang, C. (2019). The effect of overnight consolidation in the perceptual learning of non-native tonal contrasts. PloS one, 14(12), e0221498.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221498>

Rapin I. (2016). Dyscalculia and the Calculating Brain. Pediatric neurology, 61, 11–20.

<https://doi.org/10.1016/j.pediatrneurol.2016.02.007>

Rasch, B., & Born, J. (2013). About sleep's role in memory. Physiological reviews, 93(2), 681–766. <https://doi.org/10.1152/physrev.00032.2012>

Reda, F., Gorgoni, M., D'Atri, A., Scarpelli, S., Carpi, M., Di Cola, E., Menghini, D., Vicari, S., Stella, G., & De Gennaro, L. (2021). Sleep-Related Declarative Memory Consolidation in

Children and Adolescents with Developmental Dyslexia. *Brain sciences*, 11(1), 73.

<https://doi.org/10.3390/brainsci11010073>

Robertson, E. M., & Cohen, D. A. (2006). Understanding consolidation through the architecture of memories. *The Neuroscientist : a review journal bringing neurobiology, neurology and psychiatry*, 12(3), 261–271. <https://doi.org/10.1177/1073858406287935>

Robertson, E. M., Pascual-Leone, A., & Miall, R. C. (2004). Current concepts in procedural consolidation. *Nature reviews. Neuroscience*, 5(7), 576–582. <https://doi.org/10.1038/nrn1426>

Sanjeevan, T., & Mainela-Arnold, E. (2017). Procedural Motor Learning in Children With Specific Language Impairment. *Journal of speech, language, and hearing research : JSLHR*, 60(11), 3259–3269. https://doi.org/10.1044/2017_JSLHR-L-16-0457

Schendan, H. E., Searl, M. M., Melrose, R. J., & Stern, C. E. (2003). An fMRI study of the role of the medial temporal lobe in implicit and explicit sequence learning. *Neuron*, 37(6), 1013–1025. [https://doi.org/10.1016/s0896-6273\(03\)00123-5](https://doi.org/10.1016/s0896-6273(03)00123-5)

Schreiner, T., & Rasch, B. (2017). The beneficial role of memory reactivation for language learning during sleep: A review. *Brain and Language*, 167, 94–105. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2016.02.005>

Seager, C. A. (2006). The basal ganglia in human learning. *The Neuroscientist : a review journal bringing neurobiology, neurology and psychiatry*, 12(4), 285–290. <https://doi.org/10.1177/1073858405285632>

Sengottuvel, K., & Rao, P. K. (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>

Silani, G., Frith, U., Demonet, J. F., Fazio, F., Perani, D., Price, C., Frith, C. D., & Paulesu, E. (2005). Brain abnormalities underlying altered activation in dyslexia: a voxel based

morphometry study. *Brain : a journal of neurology*, 128(Pt 10), 2453–2461.

<https://doi.org/10.1093/brain/awh579>

Simor, P., Zavecz, Z., Horváth, K., Éltető, N., Török, C., Pesthy, O., Gombos, F., Janacsek, K., & Nemeth, D. (2019). Deconstructing Procedural Memory: Different Learning Trajectories and Consolidation of Sequence and Statistical Learning. *Frontiers in psychology*, 9, 2708. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02708>

Smith, F., Gaskell, M. G., Weighall, A. R., Warmington, M., Reid, A. M., & Henderson, L. M. (2018). Consolidation of vocabulary is associated with sleep in typically developing children, but not in children with dyslexia. *Developmental science*, 21(5), e12639.

<https://doi.org/10.1111/desc.12639>

Soriano-Mas, C., Pujol, J., Ortiz, H., Deus, J., López-Sala, A., & Sans, A. (2009). Age-related brain structural alterations in children with specific language impairment. *Human brain mapping*, 30(5), 1626–1636. <https://doi.org/10.1002/hbm.20620>

Squire L. R. (2004). Memory systems of the brain: a brief history and current perspective. *Neurobiology of learning and memory*, 82(3), 171–177.

<https://doi.org/10.1016/j.nlm.2004.06.005>

Squire, L. R., & Zola, S. M. (1996). Structure and function of declarative and nondeclarative memory systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 93(24), 13515–13522. <https://doi.org/10.1073/pnas.93.24.13515>

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, 173–183. <https://doi.org/10.1196/annals.1416.003>

Tambini, A., & Davachi, L. (2019). Awake Reactivation of Prior Experiences Consolidates Memories and Biases Cognition. *Trends in cognitive sciences*, 23(10), 876–890.

<https://doi.org/10.1016/j.tics.2019.07.008>

Tomblin, J. B., Mainela-Arnold, E., & Zhang, X. (2007). Procedural learning in adolescents with and without specific language impairment. *Language Learning and Development*, 3, 269–293. <https://doi.org/10.1080/15475440701377477>

Ullman M. T. (2001). A neurocognitive perspective on language: the declarative/procedural model. *Nature reviews. Neuroscience*, 2(10), 717–726. <https://doi.org/10.1038/35094573>

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>

Ullman, M. T., & Pierpont, E. I. (2005). Specific language impairment is not specific to language: the procedural deficit hypothesis. *Cortex; a journal devoted to the study of the nervous system and behavior*, 41(3), 399–433. [https://doi.org/10.1016/s0010-9452\(08\)70276-](https://doi.org/10.1016/s0010-9452(08)70276-4)

[4](https://doi.org/10.1016/s0010-9452(08)70276-4)

Ullman, M. T., & Pullman, M. Y. (2015). A compensatory role for declarative memory in neurodevelopmental disorders. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 51, 205–222.

<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2015.01.008>

Ullman, M. T., Earle, F. S., Walenski, M., & Janacsek, K. (2020). The Neurocognition of Developmental Disorders of Language. *Annual review of psychology*, 71, 389–417.

<https://doi.org/10.1146/annurev-psych-122216-011555>

Urbain, C., De Tiège, X., Op De Beeck, M., Bourguignon, M., Wens, V., Verheulpen, D., Van Bogaert, P., & Peigneux, P. (2016). Sleep in children triggers rapid reorganization of

memory-related brain processes. *NeuroImage*, 134, 213–222.

<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.03.055>

Urbain, C., Houyoux, E., Albouy, G., & Peigneux, P. (2014). Consolidation through the looking-glass: sleep-dependent proactive interference on visuomotor adaptation in children.

Journal of sleep research, 23(1), 44–52. <https://doi.org/10.1111/jsr.12082>

Van Dyck, D., Deconinck, N., Aeby, A., Baijot, S., Coquelet, N., De Tiège, X., & Urbain, C.

Atypical procedural learning skills in children with Developmental Coordination Disorder: the critical control of ADHD symptoms. *Child neuropsychology* (Under Review 2021)

Vukovic, M., Vukovic, I., & Stojanovic, V. (2010). Investigation of language and motor skills in Serbian speaking children with specific language impairment and in typically developing children. *Research in developmental disabilities*, 31(6), 1633–1644.

<https://doi.org/10.1016/j.ridd.2010.04.020>

Walker, M. P., Brakefield, T., Morgan, A., Hobson, J. A., & Stickgold, R. (2002). Practice with sleep makes perfect: sleep-dependent motor skill learning. *Neuron*, 35(1), 205–

211. [https://doi.org/10.1016/s0896-6273\(02\)00746-8](https://doi.org/10.1016/s0896-6273(02)00746-8)

West, G., Vadillo, M. A., Shanks, D. R., & Hulme, C. (2018). The procedural learning deficit hypothesis of language learning disorders: we see some problems. *Developmental science*,

21(2), e12552. <https://doi.org/10.1111/desc.12552>

Wilhelm, I., Diekelmann, S., & Born, J. (2008). Sleep in children improves memory performance on declarative but not procedural tasks. *Learning & memory* (Cold Spring

Harbor, N.Y.), 15(5), 373–377. <https://doi.org/10.1101/lm.803708>

Wilson, P. H., Maruff, P., & Lum, J. (2003). Procedural learning in children with developmental coordination disorder. *Human movement science*, 22(4-5), 515–526.

<https://doi.org/10.1016/j.humov.2003.09.007>

Figure 1 Exemple de tâche de temps de réaction sériel (TRS) adaptée à l'enfant

Figure 1. A gauche : représentation schématique de la tâche de TRS adaptée à l'enfant (voir Desmottes et al., 2017a). A droite : une représentation des profils de temps de réaction (TR) moyens attendus pour chaque bloc d'apprentissage en fonction de la séquence qui prédit l'apparition successive des stimuli. En général, l'apprentissage de la séquence est évalué grâce à la présence d'un bloc dit « de transfert » composé d'une séquence différente ou d'une présentation aléatoire des stimuli. Si le participant a correctement appris la séquence initiale, ses temps de réaction devraient progressivement diminuer au fil de la pratique de la tâche et subitement augmenter lors de la présentation du bloc de transfert. Dans le cas de cet exemple, la séquence contient des régularités fixes.