



Doctorat de l'Université de Toulouse

préparé à l'Université Toulouse - Jean Jaurès

Le rôle des fonctions cognitives dans l'estimation des durées :
étude développementale et interventionnelle dans le Trouble
du Développement Intellectuel Léger idiopathique

Thèse présentée et soutenue, le 15 novembre 2024 par

Esa GOURLAT

École doctorale

CLESCO - Comportement, Langage, Éducation, Socialisation, Cognition

Spécialité

Psychologie

Unité de recherche

SCoTE- Sciences de la Cognition, Technologie, Ergonomie (EA 7420)

Thèse dirigée par

Cédric ALBINET et Anne-Claire RATTAT

Composition du jury

Mme Christelle DECLERCQ, Présidente, Université de Reims Champagne-Ardenne

M. Arnaud ROY, Rapporteur, Université Angers

Mme Sandrine GIL, Rapporteur, Université de Poitiers

Mme Jessica TALLET, Examinatrice, Université Toulouse III - Paul Sabatier

M. Nicolas CHEVALIER, Examineur, University of Edinburgh

M. Cédric ALBINET, Directeur de thèse, INU Champollion

Mme Anne-Claire RATTAT, Co-directrice de thèse, INU Champollion

Remerciements

Je souhaiterais remercier l'ensemble des personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de thèse.

Je remercie infiniment Anne-Claire Rattat et Cédric Albinet, mes directeurs de thèse de m'avoir accompagnée tout au long de ce projet. Merci pour leur confiance, leur écoute, leur expertise et leurs relectures interminables ces derniers mois. J'ai bénéficié d'un accompagnement d'exception, avec une bienveillance et une disponibilité que je n'aurais pu imaginer.

Merci à Sandrine Gil, Arnaud Roy, Jessica Tallet, Nicolas Chevalier et Christelle Declercq d'avoir accepté d'être mon jury de thèse.

Merci au laboratoire SCoTE et à l'ensemble de ses membres pour leur accueil. Je remercie tout particulièrement Benoît Valéry pour son implication et sa contribution dans la création des tâches expérimentales et le traitement statistique des données.

Merci à Valérie Fernandez et Karen Chevalier pour leur réactivité et le temps qu'elles m'ont accordé dans la gestion de toutes ces procédures administratives complexes.

Un grand merci à l'ensemble des IME ayant accepté de participer à cette étude. Un merci tout particulier à Monique Pancaldi pour son temps, sa disponibilité et son écoute. Elle a été une personne ressource essentielle pour permettre la mise en œuvre de ce projet sur le terrain.

Merci infiniment à Leïla Margouti, mon binôme professionnel sur ma première année de thèse, puis mon binôme dans ma vie personnelle depuis. Merci pour ton soutien et ton implication dans ce projet.

Merci aux anciens et actuels Doctorants de l'Université Champollion Manon, Lucie, Valentine, Ludo et Guillaume pour tous leurs conseils, mais également pour leur amitié qui m'a permis de me sentir épanouie à Albi.

Merci à ma Maman, mon Papa, et mes sœurs Nina et Tara pour leur amour et leur soutien à tout épreuve. Merci à Nathalie et Fany mes tantes, Olivier mon oncle, et à Yves mon grand-père pour leurs conseils et encouragements.

Un merci tout particulier à Pauline, ma sœur de cœur, qui a vécu le même parcours que le mien à l'autre bout de la France. J'ai eu la chance incroyable de pouvoir partager avec toi la moindre difficulté rencontrée et de bénéficier de tes précieux conseils.

Merci à Julien, mon meilleur ami, de m'avoir soutenue et conseillée dans les meilleurs comme dans les moins bons moments, et surtout de savoir remplacer les larmes par le rire comme il le fait si bien depuis ces dix dernières années.

Merci à Joanna, Camille, Célia, Lalie, Inès, Alice, Pierre, Chris, Romain d'avoir été des amis incroyables pendant ces quatre années.

Sommaire

<i>Remerciements</i>	1
<i>Liste des travaux scientifiques</i>	7
<i>Table des illustrations</i>	8
<i>Liste des abréviations</i>	9
<i>Introduction générale</i>	11
Chapitre 1 : le Trouble du développement intellectuel	15
Article 1 : Vers une meilleure compréhension du trouble du développement intellectuel léger idiopathique : des symptômes aux modalités d'accompagnement.	15
Chapitre 2 : L'Estimation des durées	65
2.1 Définition, évaluation et modèle théorique	65
2.1.1 L'évaluation de l'estimation des durées	65
2.1.2 Le modèle d'horloge interne	67
2.2 L'estimation des durées dans le développement typique	69
2.3 L'estimation des durées dans le développement atypique	71
Chapitre 3 : Les Fonctions Exécutives et la Vitesse de Traitement de l'Information	75
3.1 Les fonctions exécutives	75
3.1.1 Définition	75
3.1.2 La modélisation des fonctions exécutives	75
3.1.2.1 La structure factorielle des FE	75
3.1.2.2 Le modèle de Diamond (2013)	77
3.1.2 Les difficultés d'évaluation des FE	78
3.1.3 Les FE dans le développement typique	79
3.1.3.1 L'inhibition	80
3.1.3.2 La mise à jour en MDT	81
3.1.3.3 La flexibilité cognitive	82
3.1.4 Les FE dans le développement atypique	83
3.2. La vitesse de traitement de l'information	85
3.2.1 Définition	85
3.2.2 L'évaluation de la VTI	86
3.2.3 La VTI dans le développement typique	86
3.2.4 La VTI dans le développement atypique	87
Chapitre 4 : Le rôle des FE et de la VTI dans l'estimation des durées	89
<i>Problématique, objectifs et hypothèses</i>	93

<i>Partie expérimentale</i>	97
1. Étude 1	97
1.1. Article 2 : Deficits of duration estimation in individuals aged 10-20 years old with idiopathic mild intellectual disability: The role of updating working memory	99
1.2. Article 3 : Deficits of Duration Estimation in individuals aged 10-20 years old with Idiopathic Mild Intellectual Disability: The role of inhibition, shifting and processing speed.....	133
1.3. Synthèse et analyses complémentaires	169
1.2.1 Quantification du retard cognitif dans le TDIL	170
1.2.2 L'importance de chaque fonction cognitive impliquée dans le retard d'estimation des durées dans le TDIL.....	171
2. Étude 2	177
2.1 Article 4 : Étude de l'impact d'un entraînement cognitif sur les capacités d'estimation des durées et exécutives chez des adolescents porteurs d'un Trouble du Développement Intellectuel Léger (TDIL).	177
2.2 Synthèse et analyses complémentaires	205
2.2.1. Analyses des données de la BRIEF.....	206
2.2.2. Analyses des données aux tests papier-crayon.....	209
<i>Discussion générale</i>	211
1. Les difficultés cognitives associées au TDIL traduisent-elles un retard développemental qui sera rattrapé à l'âge adulte ou bien un déficit ?	213
1.1 L'hypothèse du retard versus déficit	213
1.1.1 L'estimation des durées.....	215
1.1.2 L'inhibition.....	215
1.1.3 La mise à jour en MDT	216
1.1.4 La flexibilité	217
1.1.5 La VTI.....	218
1.2. L'évaluation du fonctionnement cognitif dans le TDIL	220
2. Quelles sont les fonctions cognitives impliquées dans l'estimation des durées et quelles sont les implications cliniques dans le TDIL ?	223
2.1 Le rôle de l'inhibition dans l'estimation des durées	223
2.2 Le rôle de la mise à jour en MDT dans l'estimation des durées	225
2.3 Le rôle de la flexibilité dans l'estimation des durées	227
2.4 Le rôle de la VTI dans l'estimation des durées	228
2.5 Limitations méthodologiques	229
3. Peut-on entraîner les fonctions cognitives chez des enfants porteurs d'un TDIL ? ..	232
3.1 Peut-on proposer un entraînement universel à des individus aux profils cognitifs variés ?.....	233
3.2 Quels outils d'évaluation et d'intervention pour le TDIL ?.....	235

3.3 Entraîner les fonctions altérées ou compenser en s'appuyant sur les ressources dans le TDIL ?	237
3.4 Perspectives et ouvertures.....	239
Conclusion générale	241
Références	242
Annexes	265
1. Tâches cognitives	265
1.1 Reproduction temporelle	265
1.2 Bissection temporelle.....	266
1.3 Empan dynamique spatial.....	267
1.4 Empan dynamique verbal	268
1.5 2-back	269
1.6 Go no-Go	270
1.7 Multisource interference task	271
1.8 Real animal size task	272
1.9 Wisconsin card sorting Test.....	273
1.10 Alternating run switching task.....	274
1.11 Cued task switching	275
1.12 Choice reaction time	276
2. Analyses complémentaires de l'Étude 1.....	277
Tableau 1 : Comparaisons deux à deux (TDIL 10-12 ans vs TV)	277
Tableau 2 : Comparaisons deux à deux (TDIL 13-16 ans vs TV)	277
Tableau 3 : Comparaison deux à deux (TDIL 17-20 ans vs TV).....	277

Liste des travaux scientifiques

Travaux publiés :

Gourlat, E., Rattat, A.-C., Valéry, B., & Albinet, C. (2023). Deficits of Duration Estimation in Individuals aged 10 to 20 Years Old with Idiopathic Mild Intellectual Disability: The Role of Updating Working Memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*.

Gourlat, E., Rattat, A.-C., & Albinet, C. T. (2024). Vers une meilleure compréhension du trouble du développement intellectuel léger idiopathique : Des symptômes aux modalités d'accompagnement. *Psychologie Française*.

Travaux soumis :

Gourlat, E., Rattat, A.-C., & Albinet, C. T. (en révision). Étude de l'impact d'un entraînement cognitif sur les capacités d'estimation du temps et exécutives chez des adolescents porteurs d'un Trouble du Développement Intellectuel Léger. *ANAE : Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'enfant*.

Gourlat, E., Rattat, A.-C., & Albinet, C. T. (soumis). Deficits of Duration Estimation in Individuals aged 10-20 Years Old with Idiopathic Mild Intellectual Disability: The role of Inhibition, Shifting and Processing speed. *Journal of Intellectual Disability*.

Table des illustrations

Liste des Figures

Figure 1 : Adaptation du modèle de l'horloge interne de traitement de l'information temporelle de Gibbon, Church et Meck (1984).....	68
Figure 2 : Modèle intégratif issu de Diamond (2013).....	77

Liste des Tableaux

Tableau 4 : Analyses des performances à la tâche de bissection temporelle	173
Tableau 5 : Scores bruts avec entre parenthèses T-scores et rangs percentiles au questionnaire de la BRIEF	208
Tableau 6 : Scores obtenus aux tâches d'attention soutenue (TEA-Ch) et de reconnaissance des émotions (NEPSY II).....	210

Liste des abréviations

TDI : Trouble du Développement Intellectuel

TDIL : Trouble du Développement Intellectuel Léger

TV : Tout Venants

FE : Fonctions Exécutives

VTI : Vitesse de Traitement de l'Information

MDT : Mémoire De Travail

AM : Age Mental

AC : Age Chronologique

Introduction générale

Se repérer dans le temps pour effectuer des rituels du quotidien, comme se préparer le matin, suivre une leçon à l'école, ou faire un jeu, est une compétence centrale pour évoluer de manière adaptée dans son environnement (Zakay, 2012). Cette compétence est souvent retardée, voire parfois jamais maîtrisée sans une aide extérieure, chez les personnes porteuses d'un Trouble du Développement Intellectuel Léger (TDIL). Le TDIL est un trouble neurodéveloppemental qui représente 1 à 2 % de la population en France. Or, malgré cette prévalence, cette population spécifique n'a fait l'objet que d'un nombre restreint d'études et nécessite davantage d'investigations scientifiques (Maison de l'UNESCO, 2018). En effet, la littérature scientifique, encore trop succincte, ne permet pas actuellement de dresser les tableaux clinique et cognitif précis du TDIL et d'alimenter ainsi la réflexion sur les accompagnements les mieux adaptés pour ceux et celles qui en sont porteurs. D'ailleurs, les professionnels de santé eux-mêmes expriment un manque de connaissances et d'outils lorsqu'il est question de l'accompagnement de ces personnes. Des travaux récents mettent en lumière des difficultés dans l'estimation des durées (Rattat & Collié, 2020), les fonctions exécutives (FE) et la vitesse de traitement de l'information (VTI) (e.g., Danielsson et al., 2012; Spaniol & Danielsson, 2022; Van der Molen et al., 2007; Zagaria et al., 2021) chez les jeunes atteints de TDIL comparativement à des jeunes du même âge au développement typique. D'autre part, le lien entre l'estimation des durées, les FE et la VTI a été mis en évidence dans plusieurs travaux empiriques en population typique (e.g., Baudouin et al., 2006; Brown, 2006; Droit-Volet & Hallez, 2019; Droit-Volet & Zélanti, 2013; Ogden et al., 2014, 2014, 2019; Rattat, 2010; Rattat & Chevalier, 2020; Zélanti & Droit-Volet, 2011). Néanmoins ces fonctions cognitives ont été peu voire jamais investiguées d'un point de vue développemental dans le TDIL. De la même manière, le rôle des FE et de la VTI dans les difficultés d'estimation des durées dans le TDIL n'a jamais été caractérisé. Or, une meilleure compréhension des difficultés cognitives, et de leur lien, chez les personnes porteuses d'un TDIL est cruciale pour orienter les interventions cliniques et éducatives adaptées à cette population.

Ce projet de thèse a donc comme double objectif (1) de décrire d'un point de vue développemental l'évolution des capacités d'estimation des durées, des FE et de la VTI chez les enfants et adolescents porteurs d'un TDIL idiopathique comparativement à des sujets TV appariés sur l'âge chronologique (AC), ainsi que de déterminer dans quelle mesure les FE et la VTI sont impliquées dans les difficultés d'estimation des durées des individus porteurs d'un

TDIL (Étude 1) et (2) de proposer une étude interventionnelle fournissant des données sur la faisabilité et l'efficacité d'un entraînement cognitif, afin de fournir des pistes d'accompagnement aux professionnels de santé (Étude 2).

Le cadre théorique sera composé de quatre chapitres. Le premier chapitre s'articulera autour d'un article de revue de littérature sur le TDIL publié en 2024 dans la revue *Psychologie Française* (Article 1). L'objectif de ce premier travail était de recenser les éléments de définition et les différents travaux de recherche portant sur le TDIL. Il s'agira ainsi de dresser un tableau clinique et cognitif du TDIL et de décrire les modalités d'accompagnement de cette population spécifique (Chapitre 1). Les deuxième et troisième chapitres seront respectivement consacrés aux capacités d'estimation des durées (Chapitre 2) et aux FE et à la VTI (Chapitre 3). Ces deux chapitres permettront donc de présenter des éléments de définition, des modèles théoriques, ainsi que les travaux ayant cherché à évaluer ces fonctions cognitives à la fois dans des populations typique et atypique (TDIL), et ce de manière développementale. Enfin, le quatrième et dernier chapitre se focalisera sur le lien entre l'estimation des durées, les FE et la VTI.

La partie expérimentale du présent manuscrit sera quant à elle composée de deux études distinctes permettant de répondre chacune à l'un des objectifs de ce travail de thèse. La première étude s'articulera autour de deux publications scientifiques (Articles 2 et 3) et examinera de manière systématique la trajectoire développementale des capacités d'estimation des durées, des FE et de la VTI au sein de notre population d'étude, ainsi que les relations éventuelles entre ces fonctions cognitives ; aucune étude n'ayant à ce jour proposé une telle analyse (Étude 1). Cette première étude cherchera dans un premier temps à caractériser les capacités d'estimation des durées, exécutives et la VTI chez les jeunes atteints d'un TDIL idiopathique. Dans un second temps, elle cherchera à décrire la courbe développementale de ces capacités cognitives entre 10 et 20 ans, et enfin dans un troisième temps, à identifier s'il existe un lien entre ces différentes fonctions. Plus spécifiquement elle examinera si les capacités exécutives et la VTI sont à l'origine des difficultés d'estimation des durées dans le TDIL. Une section supplémentaire présentera une synthèse globale des deux articles. La seconde étude s'articulera quant à elle autour d'un travail empirique interventionnel (Article 4) et aura pour objectif de proposer une piste d'accompagnement pour les individus porteurs d'un TDIL. Pour cela, une étude de faisabilité et d'efficacité basée sur la mise en place d'un entraînement cognitif adapté aux spécificités du TDIL a été menée sur un petit échantillon d'adolescents porteurs d'un TDIL (Étude 2). Une section supplémentaire présentera des analyses complémentaires n'apparaissant pas dans l'article soumis pour publication.

Enfin, ce travail se poursuivra par une discussion générale dont l'objectif sera d'examiner des questions ayant émergé de ces travaux expérimentaux, suivie d'une brève conclusion.

Chapitre 1 : le Trouble du développement intellectuel léger (TDIL)

Article 1 : Vers une meilleure compréhension du trouble du développement intellectuel léger idiopathique : des symptômes aux modalités d'accompagnement.

L'objectif de notre premier article était de recenser et de synthétiser les travaux pertinents examinant les fonctions cognitives dans le TDIL. En effet, bien que le nombre de travaux sur le TDI se soit accru cette dernière décennie, les études ciblant spécifiquement le TDIL idiopathique (dont la cause n'est pas connue) sont rares (INSERM, 2016; Maison de l'UNESCO, 2018). La plupart des travaux existants présente des limitations méthodologiques, principalement en raison d'échantillons qui incluent des participants porteurs de TDI avec des formes et des étiologies variées pouvant impliquer des troubles associés (e.g., Bussy et al., 2016). Ces critères d'inclusion peu restrictifs ne permettent pas de déterminer précisément si les difficultés observées sont dues au trouble intellectuel ou bien aux comorbidités associées. Cette revue a donc cherché à recenser les travaux réalisés uniquement auprès d'individus porteurs d'un TDIL idiopathique, ceux-ci ayant l'avantage de présenter des tableaux cognitifs moins hétérogènes et avec moins de troubles associés (e.g., David et al., 2014; Kok et al., 2016; Koslowski et al., 2016). De la même manière, les travaux interventionnels réalisés auprès d'un public porteur d'un TDIL sont peu nombreux et présentent également des limitations méthodologiques comme le manque d'adaptation aux spécificités du TDIL (e.g., difficultés de compréhension, capacités attentionnelles et mnésiques limitées ; Büchel & Paour, 2005). Nous avons donc cherché à identifier les principales recommandations pour la mise en œuvre d'un entraînement cognitif auprès d'adolescents porteurs d'un TDIL.

La première partie de l'article présente différents éléments de définition du TDIL. La deuxième partie propose une description du tableau clinique et cognitif du TDIL, avec pour intention de recenser le plus exhaustivement possible les travaux ayant montré l'existence de difficultés cognitives chez les individus porteurs d'un TDIL. Enfin, la dernière partie de l'article présente les travaux interventionnels réalisés auprès de ce public, et cherche à identifier les principes généraux et les limites qui en découlent ; ceci afin de concevoir un accompagnement efficace à destination de cette population spécifique.

Cet article de synthèse est actuellement publié (Gourlat et al., 2024) dans la revue *Psychologie Française* (<http://doi.org/10.1016/j.psfr.2024.03.0010033-2984/>) et a fait l'objet d'une communication orale au congrès de la SFP à Tours « Risques et Ressources à tous les âges de la vie » en 2021.

Abstract

Introduction

The present literature review aims to list as exhaustively as possible all the research studies carried out on MID (1) in terms of assessment and diagnosis, (2) in terms of clinical presentation and (3) from an interventional point of view. The objective is to provide keys to understand this pathology to the various health professionals in medical and paramedical fields.

Literature findings

Despite its high prevalence, there are few scientific studies about mild intellectual disability (MID), which causes cognitive deficits. MID is thought to affect about 1–2% of the population in France, and in nearly 80% of cases it is called idiopathic, the cause being unknown (INSERM, 2016).

Discussion

Numerous studies have proposed interventional programs with specific recommendations for this population. Definite conclusions of the reviewed literature is complicated by important heterogeneity in the methodologies used and reported results, unclear clinical presentation of MID, and methodological difficulties in groups constitution and in objective evaluation of programs effects.

Conclusion

The objective is now to summarize these methodological requirements by proposing adaptations that take into account the cognitive and behavioral profile of individuals.

Mots clés : Trouble du développement intellectuel léger, Évaluation, Diagnostic, Tableau clinique, Interventions

Keywords: Mild intellectual disability, Assessment, Diagnosis, Clinical presentation, Interventions

Abréviations

TDI : Trouble du développement intellectuel

TDIL : Trouble du développement intellectuel léger

QI : Quotient intellectuel

AM : Age mental

AC : Age chronologique

MDT : Mémoire de travail

MCT : Mémoire à court terme

FE : Fonctions exécutives

TDAH : Trouble Déficitaire de l'Attention avec ou sans Hyperactivité

TSA : Troubles du Spectre de l'Autisme

TAPA : Test d'Apprentissage de la Pensée Analogique

LEM : Leertest voor Etnische Minderheden

HART : Hessels Analogical Reasoning Test

APA : American Psychiatric Association

CIM : Classification statistique Internationale des Maladies et des problèmes de santé

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

DSM : Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders

AAIDD : American Association on Intellectual and Developmental Disabilities

WAIS : Wechsler Adult Intelligence Scale

WPPSI : Wechsler Preschool and Primary Scale of Intelligence

WISC : Wechsler Intelligence Scale for Children

EMDR : Eye Movement Desensitization and Reprocessing

TCC : Thérapies Cognitivo-Comportementales

1. Introduction

Lacer ses chaussures, se brosser les dents, ou compter sa monnaie sont des exemples de compétences essentielles pour s'adapter à l'environnement dans lequel nous évoluons. Si l'acquisition de ces compétences ne pose pas de difficulté particulière dans le développement typique, elle est en revanche souvent complexe, retardée dans le temps, voire peut ne jamais être maîtrisée complètement sans aide extérieure, chez les individus porteurs d'un trouble du développement intellectuel léger (TDIL).

Ces compétences du quotidien, simples en apparence, mobilisent de nombreux processus cognitifs et perceptivo-moteurs souvent défaillants dans le TDIL comme nous le montrerons dans cet article. Ces fragilités impactent de multiples aspects de la vie quotidienne, et notamment la qualité de vie (e.g., Dusseljee et al., 2011; Zikl et al., 2013). Il apparaît donc primordial de conduire des programmes de recherche centrés sur cette population avec le triple objectif de mieux comprendre le TDIL, faciliter son diagnostic et améliorer les modalités d'accompagnement.

Malgré la forte prévalence du TDIL en France (1 à 2% selon INSERM, 2016) les travaux scientifiques restent à ce jour trop limités et fournissent peu d'assises théoriques aux pratiques des différents professionnels qui accompagnent ces personnes au quotidien (e.g., psychologues, orthophonistes, psychomotriciens, ergothérapeutes, éducateurs spécialisés, médecins). Des recherches sur différentes plateformes de psychologie montrent l'existence de seulement 166 études sur Cairn avec les mots clés « trouble du développement intellectuel léger » ou « déficience intellectuelle légère » dans le résumé ou le titre ; et 195 études sur Pubmed avec les mots clés « mild intellectual disability » dans le résumé ou le titre. Apporter des clés de compréhension et des pistes de réflexion voire d'action à ces praticiens représente donc un enjeu majeur pour améliorer la qualité de vie des personnes porteuses de TDIL. C'est dans cette optique que les états généraux de la déficience intellectuelle, qui se sont tenus en janvier 2018 (Maison de l'UNESCO), ont rapporté que « mettre en œuvre un grand programme de recherche sur la déficience intellectuelle » constitue l'un des dix leviers destinés à améliorer les réponses d'accompagnement et de soin de cette population.

L'objectif de cet article est de dresser un état des lieux des travaux de recherche réalisés auprès d'une population porteuse de TDIL et parallèlement de mettre en lumière les zones d'ombre qui persistent autour de cette déficience. Pour ce faire, dans un premier temps seront définies les caractéristiques spécifiques et le mode d'évaluation du TDIL. Dans un second

temps, seront présentées les données issues de recherches scientifiques mettant en évidence les difficultés cognitives et comportementales de cette population. Enfin, une réflexion sur les modes et outils d'accompagnement du TDIL sera présentée.

Il est important de préciser que cette revue s'intéresse au stade léger du trouble du développement intellectuel (TDI) pour plusieurs raisons. La première est sa forte prévalence, qui témoigne d'un besoin important auquel il faut répondre. En effet, même si le taux est difficile à déterminer pour des raisons méthodologiques (e.g., diversité des tests utilisés dans les études, conditions de passations hétérogènes, échantillon hétérogène -âge, degré de sévérité, étiologie, troubles associés-), en France, il est estimé entre 10 et 20 pour 1000 (INSERM, 2016), et est modulé par l'âge, le sexe et le contexte socio-économique. En effet, il existe un phénomène de concentration des ressources médico-sociales et éducatives au profit des formes sévères du TDI au détriment des formes légères et limites, et des populations enfants par rapport aux populations adultes. On parle de génération oubliée (Fujiura, 2003; Snell et al., 2009; Tymchuk et al., 2001). Les travaux de recherche sur ce phénomène suggèrent qu'il concerne davantage les formes légères de TDI en raison d'une part de l'insuffisance d'offres de soins mais également du souhait des adultes porteurs de TDIL de s'extraire des services de soin spécialisés. La deuxième raison est le nombre trop faible d'études réalisées auprès de cette population spécifique. Enfin, la dernière raison est que cette forme de TDI est associée à moins de comorbidités (Lindblad et al., 2011). En effet, une des limites principales des travaux effectués sur le TDI est l'inclusion dans les échantillons d'étude de participants porteurs de TDI avec des troubles associés tels qu'un TDAH, un TSA, ou tout autre trouble psychiatrique (e.g., troubles psychotiques, de l'humeur, anxieux, de personnalité ; voir INSERM, 2016 pour une synthèse) (Bussy et al., 2016). Or, la présence de troubles associés ne permet pas de déterminer si les difficultés cognitives et comportementales observées relèvent de la déficience elle-même ou davantage des fragilités psychiatriques.

A noter toutefois qu'afin de rester le plus exhaustif possible, cette revue de la littérature s'intéressera autant que possible aux formes légères isolées, tout en incluant certaines études qui traitent du TDIL de manière indifférenciée (i.e., avec des comorbidités) lorsque cela est pertinent pour notre propos.

2. Qu'est-ce que le trouble du développement intellectuel ?

Dans un premier temps, il convient de définir le TDI avant de s'intéresser plus spécifiquement au TDIL. Un premier point central dans l'étude du TDI est la question du diagnostic et donc par extension de la définition même du TDI. Avant le XIX^{ème} siècle la « débilité » n'était pas dissociée de la démence, que l'on regroupait sous le terme d'arriération ou d'idiotie. C'est Esquirol en 1838 qui va pour la première fois les individualiser (Salbreux & Misès, 2005). Ensuite, Binet et Simon (1907) vont introduire au début du XX^{ème} siècle les notions d'âge mental et de quotient intellectuel avec l'idée qu'il existe des troubles de l'intelligence en lien avec des dysfonctionnements du système nerveux, pour évoluer vers la notion de handicap à la fin du XX^{ème} siècle. Son appellation dans les classifications officielles a donc évolué au fil du temps, passant de « retard mental » dans le DSM-IV (APA, 1994) et la CIM-10 (OMS, 1993) à « trouble du développement intellectuel » dans la CIM-11 (OMS, 2022) et le DSM-5 (APA, version française 2015).

Les trois organisations internationales reconnues que sont l'OMS, l'APA et l'AAIDD s'accordent sur l'existence de trois critères de définition du TDI. Le premier critère est la présence de déficits au niveau des fonctions intellectuelles telles que le raisonnement, la résolution de problèmes, la planification, la pensée abstraite, le jugement, l'apprentissage académique, l'apprentissage par l'expérience et la compréhension pratique. Ces déficits doivent être confirmés à la fois par des évaluations cliniques et par des tests d'intelligence standardisés et étalonnés. Le deuxième critère renvoie à des limitations significatives du comportement adaptatif en général qui se déclinent selon trois axes : le domaine conceptuel, le domaine social et le domaine pratique. Les habiletés conceptuelles correspondent aux capacités cognitives et perceptivo-motrices ; les habiletés sociales aux capacités socio-émotionnelles, en lien avec le rapport à l'autre ; et les habiletés pratiques aux capacités adaptatives dans les activités quotidiennes (e.g., emploi, scolarité, soins). Le troisième et dernier critère établit que l'apparition des deux premiers doit avoir lieu au cours de la période développementale, c'est-à-dire avant l'âge de 18 ans (INSERM, 2016).

Les trois instances citées précédemment s'accordent également sur la nécessité d'utiliser des tests standardisés associés à un examen clinique rigoureux pour établir le diagnostic de TDI. Ce dernier est généralement précisé par le degré de sévérité de l'atteinte intellectuelle : un quotient intellectuel (QI) compris entre 50 et 70 correspond à un TDI de forme légère, entre 35 et 50 à un TDI de forme modérée, entre 20 et 35 à un TDI de forme sévère et un QI inférieur à 20 à un TDI de forme profonde (APA, 2013). Il existe également des formes dites borderline

(TDIB) qui correspondent à un QI compris entre 70 et 85 (± 5) (APA, 2013). Bien que ces formes borderline ne soient pas considérées comme TDIL, 6 des études traitées dans cet article incluent à la fois des TDIL et des TDIB. Elles sont précédées d'un astérisque (*) dans le Tableau 1.

Dans le contexte particulier du TDIL, les caractéristiques incluent une compréhension limitée du risque dans les situations sociales associée à un jugement social immature (i.e., domaine social) ; l'exercice d'un métier exigeant peu ou moins d'habiletés cognitives (i.e., domaine pratique), ainsi qu'une technique de résolution de problème très pragmatique par rapport à des pairs appariés sur l'âge chronologique (i.e., domaine conceptuel) (APA, 2013a).

Bien qu'elles offrent une idée globale du type de difficultés que ces personnes peuvent rencontrer dans leur vie quotidienne, ces caractéristiques générales sont modulées par des variations inter- et intra-individuelles, résultant d'étiologies variées (Yaqoob et al., 2004). En effet, comme beaucoup d'autres pathologies, le TDIL peut s'intégrer dans le cadre d'une pathologie (e.g., TSA ; Embregts & van Nieuwenhuijzen, 2009) ou d'un syndrome plus global (e.g., trisomie 21, X fragile, syndrome d'alcoolisme fœtal ; Wan et al., 2017). On observe à la fois des différences inter-syndromiques (i.e., profils cognitifs différents selon l'étiologie) mais également intra-syndromiques (i.e., profils cognitifs différents pour un même syndrome génétique). La question de l'étiologie est primordiale quand on s'intéresse au TDI. D'après l'INSERM (2016), la cause du TDI est identifiée dans 40 à 60% des cas, et seulement dans 20% des cas pour le TDIL. On parle de TDIL idiopathique, lorsqu'à l'inverse, l'étiologie n'est pas connue. Les formes idiopathiques représentent actuellement 35 à 40% des TDI (Ke & Liu, 2012) et 80% des TDIL (INSERM, 2016). Les étiologies connues sont majoritairement de nature environnementale ou génétique et sont (en ce qui concerne les causes environnementales connues) principalement liées à des facteurs psychosociaux et économiques (e.g., stress maternel, statut socio-économique de la famille, manque de cohésion sociale, maltraitance). Les travaux récents s'accordent donc sur l'intérêt d'étudier préférentiellement des sujets porteurs de formes idiopathiques comparativement à des formes syndromiques en raison de leurs tableaux cliniques spécifiques (David et al., 2014; Kok et al., 2016; Koslowski et al., 2016).

Ainsi, l'étiologie ou encore les comorbidités modulent fortement le tableau clinique du TDIL et constituent donc des éléments clés dans la compréhension de la déficience et le choix d'un accompagnement spécifique. De plus, comme nous venons de le mentionner, un autre facteur central dans l'étude du TDIL est l'évaluation du QI, qui est à ce jour l'outil de diagnostic privilégié.

2.1. Qu'est-ce que l'intelligence et comment la mesurer ?

La littérature fait état de plusieurs définitions du concept d'intelligence. Un recensement et une discussion de ces définitions est au-delà de l'objectif de cet article, mais il est important de noter que plusieurs auteurs comme Piaget (1923) ou encore Binet (1909) s'accordent pour décrire l'intelligence comme la capacité à s'adapter aux situations nouvelles. A partir de ces travaux, d'autres auteurs tels que Wechsler (1938) ont créé des outils permettant d'évaluer et de mesurer l'intelligence. C'est la naissance des échelles de QI, c'est-à-dire des tests psychométriques évaluant différentes aptitudes cognitives (i.e., la compréhension verbale (ICV), le raisonnement perceptif (IRP), la mémoire de travail (IMT) et la vitesse de traitement (IVT)). Le QI, score moyen obtenu à partir des performances à ces différents tests, reflète le fonctionnement intellectuel général du sujet en comparaison à d'autres individus appariés sur l'âge chronologique (AC) et ce étalonné selon une courbe de Gauss. L'AC renvoie à la différence entre la date de passation des tests et la date de naissance de l'individu et vient s'opposer à la notion d'âge mental (AM), qui renvoie quant à elle à l'âge de développement intellectuel de l'individu, soit le niveau d'âge le plus élevé auquel il réussit le maximum d'items dans un test d'intelligence (Binet & Simon, 1907). Selon l'INSERM (2016), différents instruments sont utilisés pour évaluer le QI en France, notamment les échelles de Wechsler (WPPSI-IV, 2014 ; WISC-V, 2016 ; WAIS-IV, 2011), le KABC-II (Kaufman & Kaufman, 2008), la NEMI-2 (Cognet, 2006) ou encore des versions non verbales telles que les Matrices Progressives de Raven (Raven, 1998) ou l'échelle non verbale d'intelligence de Wechsler (WNV ; Wechsler & Naglieri, 2009). Néanmoins, de nouveaux courants remettent en question l'utilisation de ces comparaisons dites classiques de l'intelligence. Dans les travaux de recherche sur le TDI, trois groupes de participants sont généralement constitués dans les protocoles expérimentaux : un groupe porteur d'un TDI, un premier groupe contrôle (i.e., sans TDI) apparié sur l'AM et un second groupe contrôle apparié sur l'AC. La comparaison avec le groupe apparié sur l'AM est considérée comme plus pertinente par certains auteurs dans la mesure que les groupes apparaissent plus équivalents au regard de leurs capacités cognitives (Henry, 2001).

En 2010, Hessels et Gassner postulent que les comparaisons sur la base de QI sont moins valides que celles basées sur l'âge mental. Dans leur étude, ils ont proposé à la fois une comparaison dite classique avec un groupe tout-venant (i.e., sujets au développement typique) apparié sur l'AM (i.e., donc sur la base du QI) mais également une comparaison dite innovante

avec un groupe tout-venant apparié sur le potentiel d'apprentissage. Contrairement au QI, qui correspond selon les auteurs à une mesure statique de l'intelligence à un moment donné, le potentiel d'apprentissage correspondrait quant à lui à une mesure dynamique de l'intelligence reflétant la capacité du sujet à intégrer de nouvelles informations. Le potentiel d'apprentissage présenterait également l'avantage de ne pas tenir compte des différences d'opportunités d'apprentissage et de l'influence des expériences antérieures (Hessels, 2002). Les résultats de leurs travaux montrent effectivement des performances similaires entre des groupes de sujets porteurs de TDIL présentant des capacités d'apprentissage équivalentes au groupe apparié (Hessels & Gassner, 2010). De plus, les tests classiques de QI ne prennent pas en compte les variations intra- et inter-individuelles des populations spécifiques, notamment l'impact des difficultés de compréhension et de raisonnement sur l'assimilation des consignes (Hessels, 2002). L'utilisation de tests d'apprentissage, qui permettent de déterminer parmi les individus porteurs d'un TDI ceux qui pourront ou non bénéficier d'un enseignement, c'est-à-dire de tirer profit des apprentissages (Hessels, 2002), constitue donc une alternative intéressante. A titre d'exemples, le TAPA (Schlatter et al., 1997), ou le LEM (Hamers et al., 2008) ont déjà été utilisés dans différents protocoles de recherche. Dans cette même optique, l'équipe de Tiekstra (2009) a élaboré la HART, un outil d'évaluation du potentiel d'apprentissage l'enfant doit résoudre des analogies figuratives similaires à celles des matrices progressives standard de Raven, avec 15 items de complexité croissante. Contrairement à la batterie du WISC, qui explique de manière non statistiquement significative selon une analyse de régression hiérarchique multiple seulement 8,8 % de la variance de la réussite scolaire, la HART en explique quant à elle une proportion importante et significative de 40% (Tiekstra et al., 2009). La réussite scolaire est ici évaluée par un test d'apprentissage de la chimie au cours duquel les participants ont appris comment les molécules se créent et comment cela peut être représenté graphiquement via la résolution de 15 questions de complexité croissante. Les auteurs ont souhaité évaluer l'apprentissage dans un domaine scolaire moins impacté par des facteurs motivationnels et émotionnels comme les mathématiques ou le français. Ces données sont renforcées par les travaux récents d'Arvidsson et Granlund (2018) mettant en évidence que le QI n'est pas le meilleur prédicteur du fonctionnement quotidien chez les individus porteurs de TDIL. Ces données doivent néanmoins être nuancées par les nombreux travaux de recherche qui attestent de la validité prédictive des tests de QI (Deary et al., 2007; Gygi et al., 2017; Hegelund et al., 2018; Roth et al., 2015) et devraient être davantage investiguées voire combinées dans les études futures.

En somme, ces données récentes viennent questionner l'utilisation des outils classiques d'évaluation de l'intelligence à des fins interventionnelles, et plus particulièrement des compétences et capacités intellectuelles des individus porteurs de TDIL. Elles renforcent la pertinence de prendre en compte les potentialités d'apprentissage dans l'étude du TDIL afin de pouvoir proposer des prises en charge adaptées. Un autre élément essentiel pour la mise au point d'accompagnements spécifiques concerne l'identification des caractéristiques cognitives et comportementales du TDIL.

2.2. Quel est le tableau clinique du TDIL ?

Afin d'expliquer les difficultés cognitives et comportementales dans le TDIL, la littérature distingue classiquement deux approches. La première, dite développementale, considère que les enfants porteurs d'un TDI ont un développement comparable à celui d'enfants typiques, mais avec un retard. La seconde, dite déficitaire, postule quant à elle que le développement cognitif dans le TDI correspond à des déficits spécifiques des fonctions cognitives et se déroule de manière atypique par rapport à la population générale (pour une revue, voir Courbois, 2016). A l'heure actuelle, certains auteurs défendent davantage des résultats allant dans le sens de l'approche développementale (Van der Molen et al., 2007a) et d'autres allant dans le sens de l'approche déficitaire (Danielsson et al., 2012). Néanmoins, bien qu'elles aient longtemps été opposées, certains travaux considèrent qu'elles peuvent être complémentaires (Courbois, 2016). Ces approches se basent sur des méthodes d'appariement un groupe de personnes porteuses de TDI sont comparées à un groupe apparié sur l'AM et sur l'AC. Les auteurs concluent à un retard lorsque les performances des individus TDI sont comparables à celles du groupe contrôle apparié sur l'AM, et à un déficit si elles sont inférieures aux performances de ce groupe. Or, ces comparaisons présentent des limitations notamment car l'AM n'est pas toujours évalué de la même manière (Jarrold & Brock, 2004 ; Thomas et al., 2009). Une approche plus récente, l'approche neuro-constructiviste, qui s'intéresse aux trajectoires développementales, utilise sur le plan expérimental l'âge en tant que variable continue. Elle postule que le TDI résulte d'une intrication entre des composantes génétiques, neurologiques, comportementales et environnementales avec des influences bidirectionnelles.

Quelle que soit l'hypothèse explicative, le TDI se caractérise par une atteinte multiple des différents domaines cognitifs, avec une expression et une sévérité variable selon l'étiologie. Ici, seront donc évoquées les fragilités spécifiquement pour les formes légères (TDIL) selon les 3

domaines d'atteinte définis précédemment : le domaine conceptuel, le domaine social et le domaine pratique.

2.2.1 Domaine conceptuel

Sur le plan conceptuel, plusieurs travaux rapportent de multiples troubles cognitifs et perceptivo-moteurs dans le TDIL (Tableau 1). Parmi eux, l'étude de Hronis, Roberts et Kneebone (2017) s'est intéressée à l'ensemble des fonctions cognitives dans le TDIL. Elle a pointé des difficultés à la fois sur le plan langagier (i.e., production et compréhension), sur le plan mnésique (i.e., encodage, récupération et reconnaissance d'informations complexes) mais également sur le plan attentionnel et exécutif. L'ensemble des études décrivant les fragilités de cette population est répertorié dans le Tableau 1 par domaine d'étude (i.e., langage, fonctions exécutives, mémoire, motricité, catégorisation, perception, estimation temporelle).

Sur le plan langagier, le profil associé au TDIL comprend un retard de conscience phonologique (i.e., la capacité métacognitive d'analyser et de manipuler des phonèmes en lecture) (Van Tilborg et al., 2018). Des difficultés dans l'acquisition de la lecture sont retrouvées et, d'autant plus marquées sur des tâches de vitesse comparativement aux tâches de précision et plus marquées pour les mots que les pseudo-mots (di Blasi et al., 2019). Les capacités de lecture de pseudo-mots relativement épargnées révèlent une utilisation efficace de la routine de conversion graphème-phonème.

Au niveau de la motricité, des liens entre les capacités cognitives et les compétences motrices ont été mis en évidence par l'équipe de Carmeli (2008). Les auteurs ont montré chez 42 adultes porteurs de TDIL sans troubles moteurs ou sensoriels avérés, des corrélations entre leurs performances aux indices permettant le calcul du QI dans la WAIS et leurs performances à des tests évaluant la coordination main/œil. Les résultats montrent que le TDIL serait associé à la difficulté à intégrer les entrées visuelles et les mouvements de la main (i.e., indifférenciation droite/gauche). Des difficultés de coordination perceptivo-motrices impactent fonctionnellement l'inclusion dans les activités professionnelles et récréatives et les aptitudes de la vie quotidienne. Leur évaluation est donc un enjeu majeur pour favoriser la création de prises en charge précoces. Wuang et ses collaborateurs (2008) ont quant à eux cherché à évaluer le profil sensorimoteur de 233 enfants porteurs de TDIL idiopathique. Les résultats mettent en évidence des fragilités sur différentes épreuves mesurant le fonctionnement cognitif, moteur et l'intégration sensorielle par rapport à une population typique. Les capacités de motricité fine sont davantage altérées que celles de motricité globale et les fonctions sensorielles intégratives

sont quant à elles légèrement altérées. Ces difficultés sensorielles seraient susceptibles d'aggraver les difficultés motrices, car elles réduiraient le nombre d'entrées sensorielles, expliquant le manque de motivation chez les individus porteurs de déficience pour explorer leur environnement. Enfin, les indices de compréhension verbale (ICV) et de vitesse de traitement (IVT) sont des prédicteurs significatifs des fonctions de motricité globale et fine. Les auteurs concluent que l'identification précoce des déficiences ou retards sensorimoteurs est essentielle pour permettre une intervention précoce et faciliter une meilleure inclusion dans le milieu scolaire ordinaire des individus porteurs de TDIL. En 2012, Zikl et ses collaborateurs montrent que les capacités motrices d'enfants porteurs de TDIL, évaluées à partir d'un test ergo-diagnostique standardisé, sont moindres par rapport à celles des enfants typiques appariés sur l'AC. En effet, ils nécessitaient environ 10% de temps supplémentaire pour réaliser des tâches simples, et 34% pour réaliser des tâches de plus grande complexité cognitive. Une grande variabilité selon les profils cognitifs des enfants porteurs de TDIL est également rapportée.

Sur le plan perceptif, les capacités de catégorisation, c'est-à-dire de détection de similitudes entre des objets discriminables et de traitement de ces objets comme une classe ou une catégorie, semblent préservées dans la DIL. Megalakaki et ses collaborateurs (2010) ont mis en évidence chez les enfants porteurs de TDIL la même organisation et la même utilisation des catégories taxonomiques et thématiques que chez des enfants tout-venant appariés sur l'AM. Ces capacités sont toutefois modulées par l'expérience des participants et la complexité de la tâche. Hayes et Conway (2000) se sont également intéressés aux capacités de catégorisation d'enfants porteurs de TDIL. Ils ont montré que la capacité à abstraire un prototype de catégorie était préservée, tandis que l'utilisation d'informations spécifiques à l'exemplaire pour la reconnaissance était réduite. Enfin, Memisevic et Djorjevic (2018) ont réalisé une méta-analyse sur 10 études évaluant les capacités d'intégration visuomotrice, à savoir la coordination de la motricité fine et des capacités de perception visuelle dans cette population. Celle-ci révèle que les enfants porteurs de TDIL présentent des troubles de l'intégration visuomotrice comparativement à des sujets appariés sur l'AC (taille d'effet, $g = 1.75$ (95% CI [1.11, 2.38])). Les auteurs suggèrent que ces compétences d'intégration visuomotrice (i.e., la coordination de la motricité fine et des capacités de perception visuelle) devraient être la cible d'interventions scolaires intensives afin de réduire les troubles du comportement adaptatif et d'améliorer les résultats scolaires en général.

Au niveau mnésique, la plupart des travaux de recherche s'intéresse au TDI et non spécifiquement au TDIL idiopathique. De rares études spécifiques à cette population montrent une dissociation dans les apprentissages avec une préservation du traitement des informations

implicites, c'est-à-dire non accessibles de manière consciente, mais un déficit de mémorisation des informations explicites (Atwell et al., 2003, cités par Merrill et al., 2003). Dans leurs travaux, les participants ont été exposés à des chaînes de figures géométriques colorées formées sur la base d'un ensemble de règles déjà vues ou de nouvelles chaînes formées selon le même ensemble de règles ou formées de manière aléatoire. Ils devaient alors déterminer si les chaînes avaient déjà été présentées ou non. Pour présenter le même niveau d'apprentissage implicite que les participants sans TDI, les participants avec TDI ont eu besoin d'environ deux fois plus de présentations de la série originale de formes géométriques. Ces données suggèrent d'un point de vue interventionnel que certains apprentissages implicites sont efficaces et peuvent être mobilisés voire entraînés chez les personnes porteuses de TDI. Néanmoins, d'autres travaux sont nécessaires afin d'investiguer davantage le fonctionnement de la mémoire à long terme et avant d'affirmer si l'observation de ces auteurs est généralisable ou non au TDIL. Enfin, l'étude de Martin et ses collaborateurs (2000) s'est intéressée à la détérioration de la mémoire chez les individus porteurs de TDIL au cours de l'avancée en âge et a montré que celle-ci était plus précoce que dans le vieillissement typique.

Concernant les fonctions exécutives (FE), c'est-à-dire un ensemble de mécanismes cognitifs complexes de haut niveau qui interviennent dans les comportements orientés vers un but ou une activité non routinière, les résultats sont mitigés, notamment en raison de la difficulté à les évaluer précisément (e.g., tâches impliquant plusieurs FE) (pour une revue, voir Burgess, 1997). Néanmoins, il semble que le TDIL soit caractérisé par des troubles des trois composantes exécutives principales définies dans le modèle de Miyake (Miyake et al., 2000), à savoir l'inhibition, la mise à jour en mémoire de travail (MDT) et la flexibilité cognitive. De récents travaux ont confirmé les difficultés attentionnelles déjà montrées par Ellis dans les années 80 parmi les fragilités exécutives de jeunes adultes porteurs de TDIL (Zagaria et al., 2021a). La majorité des auteurs s'accorde sur l'existence de difficultés spécifiques dans les capacités d'inhibition pour cette population (Bexkens et al., 2014; Gligorović & Buha Đurović, 2014; Grada & Simoni, 2018; Schuiringa et al., 2017; Treillet et al., 2014)

Plusieurs études ont cherché à évaluer de manière indépendante l'altération des différentes composantes de la mémoire de travail dans le TDI (pour une revue voir Courbois, 2016). Les travaux de Danielsson (2012) ont évalué ces capacités chez des enfants porteurs de TDIL à l'aide de batteries de tests verbaux et non verbaux. Les résultats ont révélé des performances similaires à celles des enfants appariés sur l'AM pour les tâches de flexibilité, de mise à jour en MDT verbales et de fluences, et des performances inférieures pour les tâches d'inhibition, de planification et de mise à jour en MDT non verbales. Les performances des

enfants porteurs de TDIL étaient inférieures à celles d'enfants appariés sur l'AC pour l'ensemble des tâches. D'autres travaux se sont intéressés de manière plus spécifique à la MDT, un système dans lequel l'information peut être temporairement stockée et manipulée afin de soutenir des activités cognitives complexes en cours (Baddeley, 1986). En 2000, cet auteur élabore un modèle de MDT considérant l'existence de quatre sous-composantes : (1) la boucle phonologique qui permet le stockage temporaire des informations verbales, (2) le calepin visuospatial qui permet le stockage temporaire des informations visuospatiales, (3) l'administrateur central qui coordonne l'action de deux premières composantes et permet la mise à jour du contenu et enfin (4) le buffer épisodique qui permet le transfert et la consolidation de ces informations en mémoire à long terme. Les recherches de l'équipe de Van der Molen (2007) ont évalué le fonctionnement de la boucle phonologique et de l'administrateur central dans le TDIL. Les résultats ont montré que les performances des enfants TDIL étaient comparables à celles du groupe apparié sur l'AM. En revanche, en comparaison avec le groupe apparié sur l'AC, le stockage via la boucle phonologique était retardé, tandis que le mécanisme d'autorépétition subvocale était intact (i.e., effets de longueur des mots et de suppression articulaire préservés). De la même manière le fonctionnement de l'administrateur central est similaire chez des enfants porteurs de TDIL en comparaison avec un groupe apparié sur l'AM, mais retardé par rapport au groupe apparié sur l'AC. En 2009, la même équipe s'est intéressée aux capacités d'enfants porteurs de TDIL en MDT et en mémoire à court terme (MCT) (i.e., qui contrairement à la MDT implique seulement le stockage et non la manipulation mentale des informations), en modalité verbale et en modalité visuospatiale. Cette distinction est intéressante dans la mesure où la littérature pointe des différences selon les syndromes avec un déficit en MCT verbale et non en MCT visuospatiale dans le syndrome de Down, et à l'inverse un déficit en MCT visuospatiale avec une MCT verbale préservée dans le syndrome de Williams (Alloway et al., 2006). Les résultats de Van der Molen et al. (2009) ont mis en évidence des performances retardées chez les enfants porteurs de TDIL dans toutes les tâches de MCT et de MDT, en comparaison avec un groupe apparié sur l'AC. Concernant la comparaison avec le groupe apparié sur l'AM, deux dissociations émergeaient : une préservation de la MCT avec atteinte de la MDT et une altération du traitement en modalité verbale, contrairement à la modalité visuospatiale qui était intacte. En 2018, l'équipe de Bruns s'est intéressée plus spécifiquement aux composantes de la MDT : la répétition subvocale (i.e., mesurée par l'effet de longueur des mots) qui s'avérait retardée et la réintégration (i.e., mesurée par l'effet de lexicalité) qui serait, elle, préservée comparativement à des sujets appariés sur l'AC. Concernant le buffer épisodique, la seule étude publiée, qui ne tient pas compte du degré de

sévérité du TDI, révèle des performances équivalentes entre des enfants porteurs de TDI et des enfants typiques appariés sur l'AM (Henry, 2010). L'étude de l'équipe de Hartman (2010) montre que les enfants porteurs de TDIL présentent non seulement des retards moteurs qualitatifs mais aussi des déficiences dans les FE supérieures. Les retards dans ces deux domaines sont interdépendants, de sorte que des interventions précoces stimulant leur développement moteur et cognitif, en particulier impliquant le contrôle des objets sont recommandées par les auteurs. Une intervention améliorant leurs capacités de séquençage moteur et leur comportement d'anticipation pourrait selon eux contribuer à réduire les retards moteurs des enfants, ceci en renforçant le fonctionnement exécutif en termes d'amélioration de la préparation mentale et donc de la réponse motrice dans des situations plus complexes (en particulier les capacités de contrôle d'objet et les fonctions exécutives).

En lien avec les travaux qui précèdent sur les FE, d'autres révèlent plus largement des difficultés dans les tâches qui requièrent l'utilisation de stratégies de résolution de problème (Japundza-Milisavljevic & Maćešić-Petrović, 2008), mais ce en l'absence de groupe contrôle, et de prise de décision par rapport à un groupe apparié en AC (Bexkens et al., 2016)

Enfin, il existe des données allant dans le sens de l'hypothèse d'un retard développemental dans l'acquisition des connaissances temporelles, qu'il s'agisse de la perception et de l'organisation temporelle comparativement à un groupe apparié en AC (Janeslätt et al., 2010), de l'orientation dans le temps (Arvidsson & Jonsson, 2006; Owen & Wilson, 2006) ou encore du rythme dans la TDI toutes formes et étiologies confondues comparativement à un groupe apparié en AC (Hare et al., 2006; Maaskant et al., 2013). Récemment, Rattat et Collié (2020) ont mis en évidence une moindre capacité des enfants et adolescents porteurs d'un TDIL à estimer et catégoriser des durées, comparativement aux participants appariés sur l'AC.

En termes de recommandations, on retiendra d'un point de vue interventionnel qu'il est préférable lorsque l'on s'adresse à des individus porteurs de TDIL, de limiter la mobilisation des habiletés auditivo-verbales, visuomotrices et attentionnelles dans le choix des supports (à moins que ces composantes soient ciblées pour l'entraînement) ainsi que de privilégier les apprentissages implicites.

2.2.2 Domaine social

Dans le domaine social, les troubles émotionnels et motivationnels des personnes porteuses de TDIL ont été conceptualisés par Zigler et ses collaborateurs (1990). Selon sa théorie, il

convient de distinguer les profils psychologiques des personnes dont l'étiologie semble être organique de ceux dont l'étiologie est dite culturelle/familiale. Concernant l'étiologie organique, les travaux de Reichenberg et al. (2016) et plus récemment ceux de Lichtenstein et al. (2022) suggèrent que les formes sévères de TDI seraient davantage dues à des mutations génétiques rares tandis que les formes légères (TDIL) présenteraient des profils polygénétiques plus proches de ceux de la population générale. Concernant l'étiologie culturelle/familiale, Weisz (1990) propose qu'elle serait causée par des facteurs environnementaux (tels que des soins prénataux relativement précaires, une mauvaise alimentation pendant l'enfance et de faibles possibilités d'éducation), notamment en raison d'une prévalence plus importante dans les milieux socioéconomiques les plus précaires (Emerson, 2012). Les travaux de Duyme et al. (1999) et ceux d'Emerson sur des cohortes d'enfants porteurs de TDI viennent confirmer l'existence d'un facteur étiologique environnemental et ce d'autant plus dans les formes légères de TDI.

Dans sa théorie, Zigler postule également qu'il est possible de comparer le développement cognitif d'individus porteurs de TDI à celui d'individus typiques sur la base de l'âge mental : c'est l'hypothèse de la structure similaire qui vient s'opposer à l'approche déficitaire qui considère que la déficience n'est pas liée à un retard mais bien à des déficits cognitifs. L'hypothèse de la séquence similaire est un autre postulat défendu par Zigler, qui considère que les étapes de développement de l'enfant déficient seraient les mêmes que celles des enfants au développement typique, mais avec des transitions plus longues d'un stade à l'autre. Enfin, le dernier principe de la théorie de l'auteur est l'existence de déterminants cognitifs et motivationnels dans l'explication des difficultés d'adaptation des personnes porteuses de TDI. Les limitations dans les activités du quotidien ne seraient pas liées uniquement à des troubles cognitifs mais également à des troubles motivationnels, notamment une dépendance ou méfiance excessive à l'égard des adultes, une faible attente de succès, une faible estime de soi, une tendance à l'extra-directionnalité (tendance à orienter son comportement en fonction de l'attention et des encouragements des pairs), une faible motivation d'efficacité personnelle. Ces traits motivationnels, responsables d'un sous-fonctionnement adaptatif dans le TDI, seraient modulés par différents facteurs incluant la déprivation sociale, les négligences éducatives, les mauvais traitements et les échecs dus à l'insuffisance intellectuelle (Courbois & Facon, 2014).

On retrouve de manière consistante une altération du traitement des informations sociales et émotionnelles dans le TDIL sur des tâches de reconnaissance et de rappel d'expressions

faciales émotionnelles (Gawrylowicz et al., 2013). En 2012, Van Nieuwenhuijzena et Vriens ont montré que les performances de reconnaissance et d'interprétation des émotions, de MDT et d'inhibition permettent de prédire ces capacités de traitement de l'information sociale à AC égal. Enfin, Houtkamp et ses collaborateurs (2017) soutiennent quant à eux l'hypothèse que les adolescents TDIL qui souffrent d'anxiété sociale et de dépression, présentent un biais d'interprétation spécifique aux stimuli qui sont pertinents pour leur propre anxiété. Cela revient à dire que les adolescents socialement anxieux interprètent les situations sociales ambiguës comme plus menaçantes et affichent des cognitions biaisées pour les stimuli liés à leur anxiété uniquement. L'une des limites de cette étude, commune à beaucoup d'autres, est l'impossibilité de déterminer si ces biais cognitifs sont dus au TDIL, à l'anxiété, ou encore à une intrication entre les deux. Enfin, les travaux de Gresham et MacMillan (1997) sur le développement social et affectif d'enfants porteurs de TDIL montrent que ces derniers présentent des compétences sociales moindres et davantage de problèmes de comportement et d'intégration que leurs pairs au développement typique.

2.2.2 Domaine pratique

Le domaine pratique regroupe les répercussions de l'ensemble des difficultés cognitives, perceptivo-motrices et socio-émotionnelles que nous venons de mentionner sur le quotidien des individus porteurs de TDIL. On peut se demander si ce dernier domaine est uniquement consécutif aux deux précédents, ne permettant pas d'observer de déficit spécifique indépendamment des deux autres, ou s'il est une composante fondamentale du tableau clinique.

Sur le plan scolaire, on retrouve des difficultés d'apprentissage dans des matières fondamentales comme les mathématiques comparativement à des jeunes de même AC (Brankaer et al., 2013; Zikl et al., 2015). Les performances en mathématiques sont également retardées par rapport à un groupe apparié en AM (Brankaer et al., 2013). On observe également des fragilités dans les capacités d'intégration sociale de ces enfants au sein d'un groupe comparativement à des enfants appariés en AC (Szekeres, 2014). Une autre étude montre que les possibilités d'obtention d'un emploi, d'évolution vers une vie indépendante et de poursuite d'études postsecondaires sont plus limitées chez les enfants porteurs de TDIL comparativement à des enfants au développement typique appariés en AC (Bouck, 2014).

Par ailleurs, la revue de Freeman et ses collaborateurs (2000) recense 36 études mettant en évidence des limitations individuelles et familiales qui influencent le fonctionnement quotidien, la santé et la qualité de vie d'enfants porteurs de TDI et pour quelques-unes

spécifiquement pour le TDIL. La littérature montre également l'existence de problèmes de santé mentale et l'exposition à des désavantages sociaux et familiaux fréquents (Cooper et al., 2007; Dekker & Koot, 2003; Douma et al., 2006; Nouwens, Lucas, et al., 2017).

Ainsi, établir le tableau clinique caractéristique du TDIL permet de fournir des pistes de réflexion pour mieux cibler les interventions et adapter au mieux le quotidien de ces personnes ; notamment les programmes d'enseignement, le matériel pédagogique ou encore les activités professionnelles et sociales. Il existe encore trop peu de travaux synthétiques sur les spécificités cognitives et comportementales du TDIL, ce qui constitue une véritable difficulté à l'heure actuelle. De nouvelles études sont nécessaires afin d'investiguer davantage ces aspects. Néanmoins, certains auteurs ont cherché à évaluer l'efficacité d'interventions auprès de cette population spécifique. A nouveau, les données reposent sur un nombre limité d'études à ce jour et les programmes d'intervention présentent des limites méthodologiques (e.g., diversité des tests utilisés dans les études, conditions de passation hétérogènes, échantillon hétérogène -âge, degré de sévérité, étiologie, troubles associés-).

3. Quelles interventions pour cette population spécifique ?

Les travaux évoqués ci-dessus mettent en évidence que le TDIL est une pathologie complexe caractérisée par de multiples traits cognitifs et comportementaux, qui ont nécessairement des répercussions sur la vie quotidienne. Aussi, l'accompagnement de ces individus se doit-il d'être pluridisciplinaire. Cependant, les professionnels de santé se retrouvent souvent démunis à la fois en raison de la méconnaissance de ces difficultés, mais également de l'absence d'outils spécifiques permettant de les accompagner (Nouwens et al., 2017, 2020).

Des études ont été conduites autour de cette thématique de l'accompagnement du TDIL aussi bien sur le plan cognitif que comportemental. Dans un premier temps, seront recensées le plus exhaustivement possible les études ayant évalué l'effet d'interventions auprès de cette population spécifique. Puis, dans un second temps, les principes de base de l'accompagnement adapté de ces individus seront décrits.

3.1. Quelle efficacité des interventions auprès d'individus porteurs de TDIL ?

Pour commencer l'efficacité de plusieurs types d'interventions réalisées auprès d'un public porteur de TDIL sera discutée. Sur le plan cognitif, la plupart des programmes d'intervention ciblent la rééducation des FE.

Les recherches de Van der Molen et ses collaborateurs (2010) se sont intéressées à l'effet d'un entraînement informatisé sur les composantes de MCT et de MDT, inspiré de la « Odd-One-Out Task » (Alloway, 2007) chez 96 adolescents porteurs de TDIL. Ils ont proposé différentes tâches permettant d'entraîner les dimensions verbales et visuelles de chaque composante exécutive avec des adaptations spécifiques au TDIL (i.e., entraînement dynamique avec ajustement du nombre de séquences au niveau de l'enfant ; utilisation d'un chronomètre). Les résultats montrent que l'entraînement a permis d'augmenter les capacités en MDT, ce qui a entraîné des effets faibles mais néanmoins significatifs sur les performances à d'autres tâches scolaires et quotidiennes (e.g., arithmétique, lecture). On retrouve toutefois des dissociations avec une amélioration de la MCT verbale, contrairement à la MCT visuelle chez les individus ayant réalisé l'entraînement comparativement à un groupe contrôle. Comme cela a été préalablement observé auprès d'autres populations atypiques (i.e., enfants avec difficultés en MDT (Holmes et al., 2009 cités dans Van der Molen et al., 2010); enfants porteurs de TDAH (Klingberg et al., 2005, cités dans Van der Molen et al., 2010)), les individus porteurs de TDIL sont capables de généraliser les effets d'un entraînement à d'autres tâches (i.e., arithmétique, rappel d'une histoire). Selon Holmes et ses collaborateurs (2009), la généralisation des apprentissages serait due au délai nécessaire pour que l'entraînement se traduise par des progrès effectifs sur des tests standardisés mais aussi à la durée et au maintien des entraînements (Borkowski & Cavanaugh, 1979). De la même manière, une amélioration de la MDT visuospatiale (évaluée par une tâche d'empan spatial) contrairement à la MDT verbale (évaluée par une tâche d'empan de chiffres envers et un rappel d'écoute) est observée, à la fois sur une tâche de MDT visuospatiale et sur des tâches d'arithmétique. Contrairement à d'autres travaux (Jaeggi et al., 2008; Spencer-Smith & Klingberg, 2015 cités dans Van der Molen et al., 2010), aucun effet positif sur l'intelligence fluide (capacité de raisonnement logique par opposition à l'intelligence cristallisée qui fait référence au raisonnement via la mobilisation des connaissances et de l'expérience, Catell, 1941) n'est observé. En 2015, l'équipe de Danielsson a réalisé une méta-analyse de 10 études portant sur des entraînements cognitifs de la MDT chez des patients porteurs de TDI toutes étiologies et degrés de sévérité confondus. Les résultats montrent que seuls les entraînements mixtes de MDT incluant des composantes verbales et

visuospatiales se sont avérés efficaces (i.e., taille d'effet, $g = 0.88$ (95% CI [0.37,0.99], $p < 0.001$)) et ce en lien avec l'existence de troubles dans ces deux composantes de la MDT dans cette population spécifique (Danielsson et al., 2012, 2015; Lanfranchi et al., 2010). Les auteurs suggèrent qu'une approche métacognitive permettant d'acquérir de nouvelles stratégies (i.e., apprendre quand et comment les utiliser) et qui soit multimodale serait pertinente pour cette population (comme c'est le cas pour une population TDAH, Cortese et al., 2015). Enfin, l'équipe d'Orsolini (2019) a examiné les effets d'un entraînement cognitif dans trois contextes différents, à raison de 2 séances hebdomadaires de 2 heures chacune, pendant 8 semaines chez 5 jeunes enfants porteurs de TDIL. Le programme d'entraînement comprenait des tâches exécutives, une pratique guidée mettant l'accent sur des stratégies concrètes pour réaliser les exercices et une quantité variable de soutien adulte. La formation de base par la pratique répétée a donc été complétée par des adultes dirigeant l'interaction verbale et favorisant un contrôle attentionnel sur le maintien de l'objectif de la tâche et les stratégies susceptibles d'aider à l'exécution de la tâche. Par exemple, l'adulte demandait à l'enfant de reformuler les instructions, de sélectionner les caractéristiques sur lesquelles concentrer son attention, d'anticiper les sources possibles de confusion dans la tâche et de répéter ou de visualiser le contenu pour s'en souvenir plus tard. Les résultats montrent que la MDT verbale et la résolution de problèmes (i.e., testée à l'aide des matrices de Raven) ont été significativement améliorées.

Des travaux sur la littératie, c'est-à-dire les capacités d'analyse et de compréhension en lecture, ont été menés par Van den Bos et ses collaborateurs en 2007. Les auteurs ont cherché à améliorer les capacités de compréhension verbale et de lecture de 38 adultes porteurs de TDIL, via un programme d'enseignement de stratégies de compréhension de texte. L'entraînement, qui comprenait 15 sessions hebdomadaires d'une heure chacune pendant 3 mois, cherchait à comparer (1) l'enseignement individuel à l'enseignement collectif (i.e., petits groupes avec apprentissage réciproque), (2) l'effet direct -à court terme- de l'entraînement selon différentes stratégies de compréhension (i.e., le résumé, le questionnement, la prédiction et la clarification), (3) l'effet de transfert -à long terme- et (4) l'impact d'autres variables (i.e., lecture technique, QI, compréhension de la lecture de phrases) sur la compréhension générale du texte. Les résultats de cette étude ne révélaient pas de différence entre une condition d'enseignement individuelle et collective. En revanche, les effets à court terme de l'entraînement étaient significativement importants pour l'ensemble des stratégies de compréhension et leur transfert à la performance générale de compréhension de la lecture était encore plus marqué. Ces effets étaient également maintenus durant le suivi à 3 mois. Les auteurs évoquaient néanmoins la

nécessité de réaliser des adaptations spécifiques (e.g., position du lecteur actif, importance de la motivation, présence de réciprocité pédagogique).

Sur le plan moteur, l'équipe de Carmeli (2005) a examiné chez 22 adultes porteurs de TDIL l'effet d'un programme d'entraînement physique, proposé 3 fois par semaine pendant 6 mois, sur les capacités d'équilibre, de force et sur le bien-être en général. Au cours de cette intervention, les individus étaient amenés à réaliser des exercices centrés sur l'équilibre dynamique (45 minutes) et le renforcement musculaire (45 minutes) animés par des kinésithérapeutes et à répondre à un questionnaire évaluant le niveau de bien-être. Le groupe contrôle bénéficiait également d'une intervention proposant des exercices généraux (i.e., échauffement et exercices de mobilité et de flexibilité classiques avec des poids et des tapis de sol). Les résultats ont mis en évidence que toute activité physique améliore la perception du bien-être. En revanche, seul un programme spécifique d'entraînement de l'équilibre et de la force musculaire pouvait également améliorer la performance physique. Ces données sur l'adaptabilité de l'apprentissage moteur au sein de cette population spécifique constituent un enjeu majeur pour prévenir l'apparition du déclin fonctionnel dans les foyers d'accueil. Les auteurs suggèrent qu'un mode de vie intégrant l'activité physique pourrait permettre de mieux préserver une bonne capacité physique dans les dernières années de la vie, en particulier avec une population clinique présentant de grands risques de morbidité et de débilité. Les mécanismes impliqués dans ces processus doivent encore être approfondis, et le maintien des effets à long terme être étudié.

L'étude de Cantone et ses collaborateurs (2018) a quant à elle proposé des interventions multimodales et intégratives ciblant l'amélioration des capacités visuo-perceptives et les aptitudes motrices (souvent altérées dans le TDIL) de 50 adultes porteurs d'un TDIL. Plus précisément, la moitié d'entre eux s'est vue proposer un traitement ergothérapeutique intensif de 45 à 60 minutes sur 2 mois comprenant une rééducation motrice de la main (i.e., exercices progressifs de résistance et renforcement des membres supérieurs) et un traitement visuo-perceptif (i.e., exercices perceptifs de discrimination et de coordination visuomotrices à l'aide d'outils graphiques). L'autre moitié s'est quant à elle vue proposer une rééducation motrice classique (i.e., session journalière de 45 à 60 minutes d'exercices progressifs des membres supérieurs basés sur la résistance/force). Les résultats ont révélé une amélioration significative des performances du groupe ayant bénéficié de l'intervention spécifique par rapport au groupe contrôle, et ce dans toutes les mesures liées aux mouvements bilatéraux des mains et à l'indépendance dans les activités de la vie quotidienne. Ces données suggèrent que des interventions multimodales intégratives ciblant à la fois les capacités de perception visuelle et

les habiletés motrices constituent une approche neuro-réhabilitative efficace chez les individus porteurs de TDIL. Les auteurs supposaient que l'apprentissage moteur et les mécanismes de plasticité neuronale de la mémoire seraient à la base de la récupération observée, suggérant la présence de changements plastiques adaptatifs même dans le cerveau adulte porteur d'un TDIL.

Au niveau psychosocial, le programme « You are okay » (Riemersma et al., 2015) est un programme éducatif préventif cherchant à améliorer la perception des compétences des enfants porteurs de TDIL par eux-mêmes et par leurs parents, afin d'empêcher le développement ultérieur de problèmes socio-affectifs. L'entraînement est proposé soit à temps partiel soit dans le cadre d'un accompagnement résidentiel avec une double cible : un groupe de soutien pour les enfants (e.g., compréhension des émotions, aptitudes sociales, adaptation, métacognition sur la maladie, soutien social) proposé sur 10 séances d'1 heure 30 minutes sur 10 semaines, et une séance de rappel à 6 semaines ; et un programme éducatif en ligne pour les parents (e.g., communication, utilisation du soutien social, sensibilisation au comportement parental positif et perçu). Bien qu'encore non publiés, les résultats de cette étude suggèrent qu'un accompagnement par les parents adapté à leur propre fonctionnement intellectuel (qui est parfois également abaissé) en complément des interventions auprès de leurs enfants serait nécessaire pour réduire les troubles du comportement chez ces derniers (Riemersma et al., 2015).

Issus des travaux de Piaget, les courants de l'éducation cognitive qui se sont développés à partir des années 1970 proposent également un certain nombre de programmes spécifiques au TDI (pour une revue, voir Perret, 2016 ; Perret & Bailleux, 2019). Ils cherchent à définir et modifier les stratégies cognitives que l'enfant met en œuvre dans les situations de résolution de problème, aussi bien sur le plan cognitif (e.g., raisonnement fluide, mémoire de travail, contrôle exécutif, métacognition) que conatif (e.g., motivation, tendances d'attribution, sentiment de compétence) (Pressley et al., 1989). Ces méthodes reposent sur une conception dynamique et transactionnelle du développement de l'intelligence, les caractéristiques de l'enfant et de son environnement s'influencent réciproquement (Perret & Bailleux, 2019). On retrouve de multiples prises en charge telles que la boîte à transformation de Paour (1975), l'induction de système de règles (Orsini-Bouichou, 1982), le programme d'éducation cognitive pour jeunes enfants (Haywood et al., 1992), le programme « C'est mon avenir après tout » (Lachapelle et al., 1998) ou encore les travaux de PetitPierre (2017, 2021; Petitpierre et al., 2014; Petitpierre & Rolfo, 2019; Petitpierre & Squillaci, 2020) qui mettent en œuvre les principes de l'éducation cognitive. L'objectif est de permettre une meilleure mobilisation et une meilleure régulation de l'ensemble des ressources intellectuelles, cognitives et comportementales à partir de principes

généraux qu'il est nécessaire d'appliquer quel que soit l'accompagnement (pour une revue, voir Perret, 2016 ; Perret & Bailleux, 2019).

Bien qu'ils ne fassent pas l'objet de ce travail, il existe également plusieurs travaux proposant des interventions qui ciblent l'amélioration des troubles psychiatriques associés au TDIL (Azam et al., 2012; Endermann, 2015; Kok et al., 2016; Koslowski et al., 2016; Rodenburg et al., 2009), notamment en ayant recours à l'EMDR, technique thérapeutique basée sur la stimulation sensorielle des mouvements oculaires (Rodenburg et al., 2009) ou les thérapies cognitivo-comportementales (TCC, Azam et al., 2012).

Des travaux systémiques sur la sexualité dans le TDIL suggèrent qu'une approche formative et pragmatique de l'éducation sexuelle donnant un rôle actif aux enfants TDIL avec un travail sur la prise de conscience impliquant les proches, favorise l'indépendance et évite le conformisme et la modélisation des comportements sexuels (Dupras & Dionne, 2014).

Enfin, en 2014, Sheriff et Boon se sont questionnés sur l'efficacité d'organiseurs informatiques (i.e., outil éducatif visuel permettant de créer du lien entre des concepts, connaissances, objets et questions pour cerner une thématique) dans le quotidien de 3 jeunes étudiants porteurs d'un TDIL. Ces derniers étaient inscrits à un programme de compétences académiques fonctionnelles axé sur les aptitudes à la vie quotidienne, à raison de 20 heures par semaine pendant 7 semaines dans une salle de classe autonome et suivaient 2 cours d'enseignement général à raison de 10 heures par semaine. Avant l'intervention, les élèves devaient en l'espace de 20 minutes, résoudre une série de 9 problèmes de mots générés par l'enseignant, à savoir 3 problèmes d'addition, de soustraction et de multiplication à une étape sans aucun matériel. Les 3 étudiants ont ensuite bénéficié d'une formation à l'utilisation d'organiseurs graphiques, avec l'enseignant puis en autonomie. Pendant l'intervention, ils ont dû résoudre des problèmes similaires, cette fois-ci à l'aide d'organiseurs graphiques. Les résultats ont montré que l'utilisation d'organiseurs graphiques informatisés a induit une amélioration des résultats scolaires des 3 étudiants, qui s'est maintenue dans le temps. Dans l'ensemble, ces résultats suggèrent que les organisateurs graphiques informatisés, utilisant le logiciel Kidspiration 3β, sont des outils prometteurs pour améliorer les stratégies de résolution de problèmes comparativement aux pratiques pédagogiques plus traditionnelles.

En résumé, à l'heure actuelle, malgré la diversité des études sur les programmes d'intervention cognitifs, ces dernières sont généralement destinées au TDI en général et non spécifiquement au TDIL. Par ailleurs, elles comportent souvent des limitations méthodologiques et montrent plus ou moins de gains (Bussy, de Fréminville, et al., 2016). En

effet, les programmes présentés ne comportent pas systématiquement un échantillon homogène distinguant le degré de sévérité de la déficience et la présence de comorbidités. D'autres études sont nécessaires afin d'accroître les connaissances sur le tableau clinique spécifique du TDIL et de pouvoir proposer des interventions plus ciblées. Le rapport de l'HAS (2022) qui synthétise les préconisations d'amélioration de la qualité de vie des personnes porteuses de TDI, recommande entre autres l'adaptation des accompagnements et des apprentissages aux spécificités du TDI. Comme pour la majorité des recommandations sur les études interventionnelles, il serait judicieux de chercher à standardiser les évaluations pour faciliter les comparaisons entre les études. Une autre préconisation est l'augmentation de la taille des échantillons afin d'améliorer la fiabilité et la généralisation des résultats, en proposant par exemple des études multicentriques.

3.2. Quels principes de base adopter dans l'accompagnement du TDIL ?

On retrouve de nombreux termes dans la littérature pour désigner les pratiques interventionnelles ; on parle par exemple de remédiation, de rééducation, de thérapie, d'entraînement, de prise en charge, de stimulation ou encore de réhabilitation (Seguin et al., 2018). Selon Seguin, la rééducation renvoie à « l'ensemble des procédures mises en œuvre pour rétablir totalement ou partiellement une fonction » (p. 148), alors que la remédiation « ne vise pas uniquement l'amélioration des processus cognitifs à proprement parler, mais également le développement de stratégies permettant à l'individu de s'ajuster à son environnement » (p. 148). Les autres termes sont plus spécifiques soit à une population soit à un processus en particulier (Seguin et al., 2018).

Seron et Van der Linden (2016) distinguent 3 types de procédures se recouvrant plus ou moins : celles visant l'amélioration des fonctions déficitaires, celles permettant l'optimisation des fonctions préservées, et celles basées sur un aménagement de l'environnement. Quelle que soit la procédure utilisée, on retrouve deux étapes fondamentales : l'évaluation des capacités cognitives et comportementales et la mise en place d'une méthode d'intervention. En parallèle, 9 principes-clés des programmes d'intervention cognitive doivent être déterminés : les buts à atteindre, le niveau de base de la performance pour ces différents buts, le niveau de la performance qui indiquera que les buts ont été partiellement ou entièrement atteints, les techniques et méthodes d'intervention adaptées aux caractéristiques du patient, les exercices pratiques à réaliser au quotidien, les proches impliqués dans le processus, l'ajustement des méthodes en fonction des progrès si nécessaire, la prise en compte des facteurs émotionnels et

l'évaluation des résultats de l'intervention (Seron & Van der Linden, 2016). Également, les travaux de l'équipe de Maillart (Maillart et al., 2014, cités dans Seguin et al., 2018) identifient 10 axes autour desquels penser les interventions : l'intensité des séances, l'engagement du sujet, les feedbacks cognitifs, le renforcement, la répétition, l'utilisation de l'apprentissage distribué, la spécificité, la complexité, les erreurs et les schémas. Enfin, les courants de l'éducation cognitive mettent en évidence des principes dans la mise en place d'un accompagnement de personnes porteuses de déficience centrées d'une part autour de la relation thérapeutique (instaurer une relation sécurisante et étayante, donner un sens à la prise en charge et changer le statut de l'erreur, structurer le cadre physique, symbolique et temporel) et d'autre part sur la médiation et la création de tâches (s'engager auprès de l'enfant, proposer des activités qui sollicitent un traitement actif et réflexif, permettre à l'enfant de contrôler ses actions, favoriser le langage interne et la verbalisation de l'action, travailler en jouant, utiliser des environnements réguliers et durables) (pour une revue, voir Perret, 2016; Perret & Bailleux, 2019).

Dans le contexte du TDI, on cherche à comparer les performances entre des individus au développement typique et des individus porteurs du trouble, avant et après intervention (Belmont & Butterfield, 1977, cités dans Büchel & Paour, 2005). Or, les programmes classiques d'intervention sont adressés à des sujets typiques capables de comprendre et de prendre conscience des conséquences de leurs actions, d'abstraire des concepts, de mettre en place des stratégies pour améliorer leur efficacité. L'application de ces programmes à des populations spécifiques comme le TDI nécessite des adaptations (Büchel & Paour, 2005). Les auteurs distinguent 4 types de limitations dans le TDI : structurales (i.e., capacités mnésiques limitées), conceptuelles (i.e., troubles de la compréhension), langagières (i.e., retard et/ou déficit des compétences verbales) et motivationnelles (i.e., difficultés à maintenir l'intérêt et l'engagement). Par ailleurs, plusieurs recherches montrent que le maintien des apprentissages au quotidien et le transfert des effets à la rééducation d'autres tâches sont également difficiles au regard des spécificités de cette population (Bussy, de Fréminville, et al., 2016). Des travaux cherchant à entraîner les fonctions exécutives ont mis en évidence un bon transfert sur les capacités attentionnelles et exécutives dans le TDAH avec le logiciel Cogmed (Spencer-Smith & Klingberg, 2015, cités dans Côté et al., 2016). Cela pourrait constituer, avec les adaptations nécessaires, une piste dans la rééducation des fonctions exécutives dans le TDIL. En revanche, il existe peu de données de ce type portant sur le TDI, et les quelques données existantes

montrent un transfert proche exclusivement sur les tâches similaires à celles proposées lors de la remédiation (Kirk et al., 2015, cités dans Bussy et al., 2016).

Ainsi, les chercheurs identifient plusieurs axes pour adapter les programmes d'intervention au TDI: évaluer le niveau de conscience, favoriser un comportement actif avec un intérêt soutenu pour les tâches, verbaliser explicitement les stratégies à mettre en œuvre, utiliser des supports visuels, contrôler la durée et l'intensité de l'entraînement, proposer des aides et la répétition des items, et vérifier la validité adaptative de la tâche et des stratégies enseignées dans la vie quotidienne (Büchel & Paour, 2005). D'autres travaux suggèrent l'utilisation de technologies et de formats ludiques comme la réalité virtuelle (Kirk et al., 2015), l'augmentation du temps de l'entraînement et du temps passé par niveau de difficulté (Söderqvist et al., 2012, cités dans Bussy et al., 2016), l'augmentation du nombre de sessions et les modifications du niveau de difficulté (Ottersen & Grill, 2015, cités dans Bussy et al., 2016), un entraînement intensif (Bennett et al., 2013; Van der Molen et al., 2010, cités dans Bussy et al., 2016), la dimension multimodale de l'entraînement (i.e., verbale et visuospatiale) (Danielsson et al., 2015) ; la prise en compte de la zone proximale de développement définie par Vygotsky dans la construction du programme (i.e., écart entre ce que l'enfant sait faire seul et ce qu'il peut faire s'il est accompagné) ; l'entraînement de plusieurs fonctions cognitives distinctes (Cortese et al., 2015, cités dans Bussy et al., 2016), le rôle des parents au quotidien en interaction avec celui de professionnels compétents (i.e., approche écologique) (Côté et al., 2016), ou encore l'ajout de composantes métacognitives en incluant une phase de prise de conscience des stratégies cognitives à mettre en œuvre pour réaliser la tâche (Bussy et al., 2016; Büchel & Hessels-Schlatter, 2001). Il ressort qu'un entraînement idéal comprendrait donc 8 à 10 séances de 6 à 20 minutes réparties sur 5 jours par semaine pendant 4 à 7 semaines (Bennett et al., 2013; Kirk et al., 2015; Van der Molen et al., 2010). Selon Bussy et son équipe (2016), il est essentiel de sélectionner un échantillon suffisamment grand, comprenant des individus sans étiologies multiples, avec des profils cognitifs similaires (i.e., effectuer une évaluation neuropsychologique en amont), d'y associer un groupe contrôle, d'utiliser des méthodes alternatives tenant compte du niveau des participants, d'homogénéiser au mieux les conditions de passation.

En somme, les retards et déficits cognitifs caractérisant le TDI, qu'ils soient langagiers, mnésiques, sensorimoteurs, motivationnels ou encore liés au raisonnement, impactent nécessairement la capacité des individus à intégrer un programme interventionnel (Büchel &

Paour, 2005). Ils nécessitent des adaptations spécifiques et doivent être pris en compte dans l'interprétation des résultats (Bussy, et al., 2016).

4. Enjeux, perspectives futures et conclusion

Le TDIL est complexe, encore relativement méconnu, et nécessite d'être davantage investigué par les chercheurs avec le triple objectif de fournir des outils permettant aux professionnels de mieux comprendre les caractéristiques du TDIL, de mieux diagnostiquer, et de mieux accompagner ces individus.

Le premier enjeu est donc de définir clairement le profil cognitif et comportemental associé au TDIL. A l'heure actuelle, les études publiées présentent généralement des échantillons très hétérogènes incluant différents degrés de sévérité du TDI, avec parfois des troubles associés, et des étiologies variées. Or, ces facteurs modulent le tableau clinique et doivent être pris en compte dans l'étude de cette population spécifique. De plus, ces études ne permettent généralement pas de déterminer si les déficits résultent du TDI ou bien des troubles associés, ce qui est à l'origine de contradictions dans la littérature. C'est pourquoi il semble pertinent de s'intéresser aux formes idiopathiques sans comorbidités dans les futures recherches.

Le second enjeu est de mieux diagnostiquer le TDIL et vient questionner l'évaluation de l'intelligence et donc de la déficience. En effet, des travaux, notamment ceux de Hessels, mettent en avant l'aspect statique des méthodes traditionnelles qui ne reflètent pas forcément les potentialités des individus dans leur globalité. Ainsi, réenvisager plus globalement l'évaluation de l'intelligence, notamment en associant des outils plus dynamiques comme le potentiel d'apprentissage, représente un enjeu important pour les perspectives d'études auprès de cette population. Cela permettrait de proposer des accompagnements plus adaptés. Malgré une expansion au cours de ces dernières années, on peut évoquer le manque d'outils spécifiques d'évaluation des capacités qui sont particulièrement affectées dans le TDI, notamment les fonctions exécutives et les capacités temporelles, celles-ci étant primordiales pour s'adapter au mieux à son environnement.

Enfin, le dernier enjeu est de mieux accompagner les individus porteurs de TDIL. En termes de recommandations, on retiendra d'un point de vue interventionnel des études présentées ci-dessus qu'il est nécessaire lorsque l'on travaille avec un public porteur de TDIL : de proposer des séances d'entraînement courtes, réparties de manière intensive sur quelques mois, de favoriser la concentration et la motivation en proposant des séances courtes avec un

contenu ludique, de travailler sur la prise de conscience des forces, faiblesses et stratégies d'apprentissage, de proposer un étayage sur le plan émotionnel en valorisant la confiance en soi, de proposer des activités s'approchant des situations du quotidien mobilisant plusieurs habilités cognitives, sociales et émotionnelles, et enfin de s'ajuster aussi bien au niveau de difficulté qu'aux besoins émotionnels de l'individu.

Ainsi, le manque de connaissances sur le TDIL idiopathique, mais également les difficultés méthodologiques pour constituer les échantillons et évaluer la déficience, expliquent en grande partie pourquoi, à l'heure actuelle, il existe peu d'études interventionnelles menant à des effets auprès de cette population spécifique. Les quelques travaux existants tiennent encore trop peu compte de l'ensemble des spécificités de celle-ci, ce qui pourrait rendre compte des effets très hétérogènes des programmes d'entraînement (Büchel & Paour, 2005 ; Bussy et al., 2016). Néanmoins, les rares études menées jusqu'à présent indiquent la faisabilité d'une rééducation des fonctions cognitives dans le TDI (Bussy et al., 2016). L'objectif maintenant est donc de pallier ces fragilités méthodologiques en proposant des adaptations tenant compte du profil cognitif et comportemental des individus.

Pour conclure, un enjeu important est de questionner, voire repenser, le diagnostic et l'évaluation du TDI, afin de proposer des outils spécifiques d'évaluation et d'accompagnement des difficultés qui soient adaptés aux spécificités de cette population. D'autres études sont encore nécessaires afin d'approfondir et standardiser le profil et évaluer les interventions dans le TDIL.

Liens d'intérêts

Elsa Gourlat, Anne-Claire Rattat et Cédric Albinet déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts

Financements

Travail réalisé dans le cadre de la thèse de Elsa Gourlat, co-financée par la région Occitanie et l'INU Champollion.

Références

- Alloway, T. P. (2007). *Automated Working Memory Assessment*. London: Pearson Assessment.
- Alloway, T. P., Gathercole, S. E., & Pickering, S. J. (2006). Verbal and visuospatial short-term and working memory in children: Are they separable? *Child Development*, 77(6), 1698–1716. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2006.00968.x>
- American Psychiatric Association. (1994). *Statistical Manual of mental disorders*. American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders: DSM-5* (Vol. 5, No. 5, p. xliv, 947). Washington, DC: American Psychiatric Association Publishing, Inc. <https://doi.org/10.1176/appi.books.9780890425596>
- American Psychiatric Association. (2015). *Statistical Manual of mental disorders*.
- Arvidsson, G., & Jonsson, H. (2006). The impact of time aids on independence and autonomy in adults with developmental disabilities. *Occupational Therapy International*, 13(3), 160–175. <https://doi.org/10.1002/oti.215>
- Arvidsson, P., & Granlund, M. (2018). The relationship between intelligence quotient and aspects of everyday functioning and participation for people who have mild and borderline intellectual disabilities. *Journal of Applied Research in Intellectual Disabilities: JARID*, 31(1), e68–e78. <https://doi.org/10.1111/jar.12314>
- Azam, K., Serfaty, M., King, M., Martin, S., Strydom, A., Parkes, C., & Hassiotis, A. (2012). The development of manualised cognitive behaviour treatment for adults with mild intellectual disability and common mental disorders. *Psychiatrike = Psychiatriki*, 23(2), 109–116.
- Baddeley, A. (1986). *Working memory* (Oxford Psychology Series No. 11). Oxford, England: Clarendon Press.
- Barton-Hulsey, A., Sevcik, R. A., & Ronski, M. (2017). Narrative language and reading comprehension in students with mild intellectual disabilities. *American journal on intellectual and developmental disabilities*, 122(5), 392–408.
- Belmont, J. M., & Butterfield, E. C. (1977). The instructional approach to developmental cognitive research. *Perspectives on the development of memory and cognition*. pp. 437–481.
- Bennett, S. J., Holmes, J., & Buckley, S. (2013). Computerized memory training leads to sustained improvement in visuospatial short-term memory skills in children with Down

- syndrome. *American Journal on Intellectual and Developmental Disabilities*, 118(3), 179–192. <https://doi.org/10.1352/1944-7558-118.3.179>
- Bexkens, A., Jansen, B. R., Van der Molen, M. W., & Huizenga, H. M. (2016). Cool decision-making in adolescents with behavior disorder and/or mild-to-borderline intellectual disability. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 44(2), 357–367. <https://doi.org/10.1007/s10802-015-9996-8>
- Bexkens, A., Ruzzano, L., Collot d'Escury-Koenigs, A. M. L., Van der Molen, M. W., & Huizenga, H. M. (2014). Inhibition deficits in individuals with intellectual disability: A meta-regression analysis: Meta-regression of inhibition in ID. *Journal of Intellectual Disability Research*, 58(1), 3–16. <https://doi.org/10.1111/jir.12068>
- Binet, A., & Simon, T. (1907). Le développement de l'intelligence chez les enfants. *L'Année psychologique*, 14(1), 1–94. <https://doi.org/10.3406/psy.1907.3737>
- Bexkens, A., Van der Molen, Collot d'Escury-Koenigs, & Huizenga, H. M. (2014). Interference control in adolescents with mild-to-borderline intellectual disabilities and/or behavior disorders. *Child Neuropsychology*, 20(4), 398–414.
- Binet, A. (1909). Les signes physiques de l'intelligence chez les enfants. *L'Année psychologique*, 16(1), 1–30.
- Borkowski, J. G., Schneider, W., & Pressley, M. (1989). The Challenges of Teaching Good Information Processing to Learning Disabled Students. *International Journal of Disability, Development and Education*, 36(3), 169–185.
- Bouck, E. C. (2014). The postschool outcomes of students with mild intellectual disability: Does it get better with time? *Journal of Intellectual Disability Research: JIDR*, 58(6), 534–548. <https://doi.org/10.1111/jir.12051>
- Brankaer, C., Ghesquière, P., & De Smedt, B. (2013). The development of numerical magnitude processing and its association with working memory in children with mild intellectual disabilities. *Research in Developmental Disabilities*, 34(10), 3361–3371. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.07.001>
- Bruns, G., Ehl, B., & Grosche, M. (2018). Verbal working memory processes in students with mild and borderline intellectual disabilities: Differential developmental trajectories for rehearsal and redintegration. *Frontiers in Psychology*, 9, 2581. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02581>
- Büchel, F. P., & Hessels-Schlatter, C. (2001). Apprentissages cognitifs. In *Manuel de psychologie des handicaps : Sémiologie et principes de remédiation*. Mardaga., p. 49–80. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:14445>

- Büchel, F. P., & Paour, J.-L. (2005). Déficience intellectuelle : Déficits et remédiation cognitive. *Enfance*, 57(3), 227–240. <https://doi.org/10.3917/enf.573.0227>
- Burgess, P. W. (1997). Theory and methodology in executive function research. In P. Rabbitt (Ed.), *Methodology of frontal and executive function* (pp. 87–121). Routledge.
- Bussy, G., de Freminville, B., & Touraine, R. (2016). Rééducation cognitive de la déficience intellectuelle : Possibilités et limites. *ANAE : Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant*, 28(141), 225–231.
- Cantone, M., Catalano, M. A., Lanza, G., La Delfa, G., Ferri, R., Pennisi, M., Bella, R., Pennisi, G., & Bramanti, A. (2018). Motor and perceptual recovery in adult patients with mild intellectual disability. *Neural Plasticity*, 2018, 3273246. <https://doi.org/10.1155/2018/3273246>
- Carmeli, E., Bar-Yossef, T., Ariav, C., Levy, R., & Liebermann, D. G. (2008). Perceptual-motor coordination in persons with mild intellectual disability. *Disability and Rehabilitation*, 30(5), 323–329. <https://doi.org/10.1080/09638280701265398>
- Carmeli, E., Zinger-Vaknin, T., Morad, M., & Merrick, J. (2005). Can physical training have an effect on well-being in adults with mild intellectual disability? *Mechanisms of Ageing and Development*, 126(2), 299–304. <https://doi.org/10.1016/j.mad.2004.08.021>
- Cattell, R. B. (1943). The measurement of adult intelligence. *Psychological bulletin*, 40(3), 153.
- Cavanaugh, J. C., & Borkowski, J. G. (1979). The metamemory-memory “connection”: Effects of strategy training and maintenance. *The Journal of General Psychology*, 101(2), 161–174.
- Cognet, G. (2006). *Manuel de la Nemi-2*. Paris: ECPA.
- Cooper, S.-A., Smiley, E., Morrison, J., Williamson, A., & Allan, L. (2007). Mental ill-health in adults with intellectual disabilities: Prevalence and associated factors. *The British Journal of Psychiatry*, 190(1), 27–35. <https://doi.org/10.1192/bjp.bp.106.022483>
- Cortese, S., Ferrin, M., Brandeis, D., Buitelaar, J., Daley, D., Dittmann, R. W., Holtmann, M., Santosh, P., Stevenson, J., Stringaris, A., Zuddas, A., & Sonuga-Barke, E. J. S. (2015). Cognitive training for attention-deficit/hyperactivity disorder: Meta-analysis of clinical and neuropsychological outcomes from randomized controlled trials. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 54(3), 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2014.12.010>

- Côté, V., Couture, C., & Lippé, S. (2016). Fonctionnement de l'enfant qui présente une déficience intellectuelle & pistes d'intervention. *Revue québécoise de psychologie*, 37(2), 121–140. <https://doi.org/10.7202/1040040ar>
- Courbois, Y. (2016). Déficiences intellectuelles. Approches cognitives et développementales. EDP Sciences.
- Courbois, Y., & Facon, B. (2014). Les savoirs de la psychologie cognitive. *Handicap, une encyclopédie des savoirs*, 257-272.
- Danielsson, H., Henry, L., Messer, D., & Rönnberg, J. (2012). Strengths and weaknesses in executive functioning in children with intellectual disability. *Research in Developmental Disabilities*, 33(2), 600–607. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.11.004>
- Danielsson, H., Zottarel, V., Palmqvist, L., & Lanfranchi, S. (2015). The effectiveness of working memory training with individuals with intellectual disabilities—A meta-analytic review. *Frontiers in Psychology*, 6, 1230. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01230>
- David, M., Dieterich, K., Billette de Villemeur, A., Jouk, P.-S., Counillon, J., Larroque, B., Bloch, J., & Cans, C. (2014). Prevalence and characteristics of children with mild intellectual disability in a French county. *Journal of Intellectual Disability Research: JIDR*, 58(7), 591–602. <https://doi.org/10.1111/jir.12057>
- Deary, I. J., Strand, S., Smith, P., & Fernandes, C. (2007). Intelligence and educational achievement. *Intelligence*, 35(1), 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2006.02.001>
- Dekker, M. C., & Koot, H. M. (2003). DSM-IV disorders in children with borderline to moderate intellectual disability. II: Child and family predictors. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 42(8), 923–931. <https://doi.org/10.1097/01.CHI.0000046891.27264.C1>
- Di Blasi, F. D., Buono, S., Cantagallo, C., Di Filippo, G., & Zoccolotti, P. (2019). Reading skills in children with mild to borderline intellectual disability: A cross-sectional study on second to eighth graders. *Journal of Intellectual Disability Research: JIDR*, 63(8), 1023–1040. <https://doi.org/10.1111/jir.12620>
- Douma, J. C. H., Dekker, M. C., Verhulst, F. C., & Koot, H. M. (2006). Self-reports on mental health problems of youth with moderate to borderline intellectual disabilities. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 45(10), 1224–1231. <https://doi.org/10.1097/01.chi.0000233158.21925.95>

- Dupras, A., & Dionne, H. (2014). The concern of parents regarding the sexuality of their child with a mild intellectual disability. *Sexologies*, 23(4), e79–e83.
<https://doi.org/10.1016/j.sexol.2013.09.002>
- Dusseljee, J. C. E., Rijken, P. M., Cardol, M., Curfs, L. M. G., & Groenewegen, P. P. (2011). Participation in daytime activities among people with mild or moderate intellectual disability. *Journal of Intellectual Disability Research: JIDR*, 55(1), 4–18.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2788.2010.01342.x>
- Duyme, M., Dumaret, A.-C., & Tomkiewicz, S. (1999). How can we boost IQs of “dull children”? A late adoption study. *Proceeding of the National Academy of Sciences*, 96, 8790–8794.
- Embregts, P., & van Nieuwenhuijzen, M. (2009). Social information processing in boys with autistic spectrum disorder and mild to borderline intellectual disabilities. *Journal of Intellectual Disability Research: JIDR*, 53(11), 922–931.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2788.2009.01204.x>
- Emerson, E. (2012). Deprivation, ethnicity and the prevalence of intellectual and developmental disabilities. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 66, 218–224.
- Endermann, M. (2015). Rehabilitation for young adults with epilepsy and mild intellectual disabilities: Results of a prospective study with repeated measurements. *Seizure*, 26, 72–80. <https://doi.org/10.1016/j.seizure.2015.02.002>
- Freeman, S. F. N., & Alkin, M. C. (2000). Academic and social attainments of children with mental retardation in general education and special education settings. *Remedial and Special Education*, 21(1), 3–26. <https://doi.org/10.1177/074193250002100102>
- Fujiura, G. T. (2003). Continuum of intellectual disability: Demographic evidence for the “forgotten generation”. *Mental Retardation*, 41(6), 420–429.
[https://doi.org/10.1352/0047-6765\(2003\)41<420:COIDDE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1352/0047-6765(2003)41<420:COIDDE>2.0.CO;2)
- Gawrylowicz, J., Gabbert, F., Carson, D., Lindsay, W. R., & Hancock, P. J. B. (2013). Face recognition and description abilities in people with mild intellectual disabilities. *Journal of Applied Research in Intellectual Disabilities: JARID*, 26(5), 435–446.
<https://doi.org/10.1111/jar.12028>
- Gligorovic, M., & Buha Đurovic, N. (2014). Inhibitory control and adaptive behaviour in children with mild intellectual disability. *Journal of Intellectual Disability Research: JIDR*, 58(3), 233–242. <https://doi.org/10.1111/jir.12000>

- Grada, C., & Simoni, E. (2018). Inhibitory control of attention difference versus developmental theory findings in mild intellectual disability and ADHD. *Journal of Childhood & Developmental Disorders*, 04, 13–14. <https://doi.org/10.4172/2472-1786.100076>
- Gresham, F. M., & MacMillan, D. L. (1997). Social competence and affective characteristics of students with mild disabilities. *Review of Educational Research*, 67(4), 377–415. <https://doi.org/10.2307/1170514>
- Gygi, J. T., Hagmann-von Arx, P., Schweizer, F., & Grob, A. (2017). The predictive validity of four intelligence tests for school grades: A small sample longitudinal study. *Frontiers in Psychology*, 8 <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2017.00375>
- Hamers, J. H. M., Hessels, M. G. P., & Pennings, A. H. (2008). Learning potential in ethnic minority children. *European Journal of Psychological Assessment*, 12(3), 183–192. <https://doi.org/10.1027/1015-5759.12.3.183>
- Hare, D. J., Jones, S., & Evershed, K. (2006). Objective investigation of the sleep-wake cycle in adults with intellectual disabilities and autistic spectrum disorders. *Journal of Intellectual Disability Research: JIDR*, 50(10), 701–710. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2788.2006.00830.x>
- Hartman, E., Houwen, S., Scherder, E., & Visscher, C. (2010). On the relationship between motor performance and executive functioning in children with intellectual disabilities. *Journal of Intellectual Disability Research: JIDR*, 54(5), 468–477. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2788.2010.01284.x>
- HAS. (2022). L'accompagnement de la personne présentant un trouble du développement intellectuel (volet 1). Principes généraux. Haute Autorité de Santé (doctoral dissertation).
- Hayes, B. K., & Conway, R. N. (2000). Concept acquisition in children with mild intellectual disability: Factors affecting the abstraction of prototypical information. *Journal of Intellectual & Developmental Disability*, 25(3), 217–234. <https://doi.org/10.1080/13269780050144280>
- Haywood, H. C., Brooks, P., & Burns, S. (1985). Stimulating cognitive development at developmental level: A tested, non-remedial preschool curriculum for preschoolers and older retarded children. *Special Services in the Schools*, 3(1–2), 127–147.
- Hegelund, E. R., Flensburg-Madsen, T., Dammeyer, J., & Mortensen, E. L. (2018). Low IQ as a predictor of unsuccessful educational and occupational achievement: A register-based study of 1,098,742 men in Denmark 1968–2016. *Intelligence*, 71, 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2018.10.002>

- Henry, L. A. (2001). How does the severity of a learning disability affect working memory performance? *Memory*, 9(4–6), 233–247.
<https://doi.org/10.1080/09658210042000085>
- Henry, L. A. (2010). The episodic buffer in children with intellectual disabilities: An exploratory study. *Research in Developmental Disabilities*, 31(6), 1609–1614.
<https://doi.org/10.1016/j.ridd.2010.04.025>
- Hessels, M. G. P. (2002). L'intelligence et la capacité d'apprentissage. *Résonances*, 4, 14–15.
- Hessels, M. G. P., & Gassner, M. (2010). L'étude des processus cognitifs chez les personnes avec déficience intellectuelle : La remise en question de la validité de l'appariement de groupes selon l'âge mental. *Schweizerische Zeitschrift für Heilpädagogik*, 16, 37–42. Hodapp, R. M.,
- Burack, J. A., & Zigler, E. (1990). The developmental perspective in the field of mental retardation. *Issues in the developmental approach to mental retardation*, 3-26.
- Holmes, J., Gathercole, S. E., & Dunning, D. L. (2009). Adaptive training leads to sustained enhancement of poor working memory in children. *Developmental Science*, 12(4), F9–F15. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00848.x>
- Houtkamp, E. O., van der Molen, M. J., de Voogd, E. L., Salemink, E., & Klein, A. M. (2017). The relation between social anxiety and biased interpretations in adolescents with mild intellectual disabilities. *Research in Developmental Disabilities*, 67, 94–98.
<https://doi.org/10.1016/j.ridd.2017.06.003>
- Hronis, A., Roberts, L., & Kneebone, I. (2017). A review of cognitive impairments in children with intellectual disabilities: Implications for cognitive behaviour therapy. *British Journal of Clinical Psychology*, 56(2), 189–207. INSERM. (2016). Déficiences intellectuelles. INSERM – La science pour la santé, Coll. « Expertise collective ». <https://www.inserm.fr/information-en-sante/expertises-collectives/deficiences-intellectuelles>
- Jaeggi, S. M., Buschkuhl, M., Jonides, J., & Perrig, W. J. (2008). Improving fluid intelligence with training on working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(19), 6829–6833.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0801268105>
- Janeslätt, G., Granlund, M., Kottorp, A., & Almqvist, L. (2010). Patterns of time processing ability in children with and without developmental disabilities. *Journal of Applied Research in Intellectual Disabilities*, 23(3), 250–262. <https://doi.org/10.1111/j.1468-3148.2009.00528.x>

- Japundza-Milisavljevic, M., & Macesic-Petrovic, D. (2008). Executive functions in children with intellectual disabilities. *The British Journal of Development Disabilities*, 54, 113–121. <https://doi.org/10.1179/096979508799103233>
- Jarrold, C., & Brock, J. (2004). To match or not to match? Methodological issues in autism-related research. *Journal of autism and developmental disorders*, 34, 81–86.
- Kaufman, A., & Kaufman, N. (2008). *K-ABC II*. Les Éditions du Centre de psychologie appliquée. Ke, X., & Liu, J. (2012). Intellectual disability. In J. M. Rey (Ed.), *IACAPAP e-Textbook of child and adolescent mental health*. Geneva: International Association for Child and Adolescent Psychiatry and Allied Professions.
- Kirk, H. E., Gray, K., Riby, D. M., & Cornish, K. M. (2015). Cognitive training as a resolution for early executive function difficulties in children with intellectual disabilities. *Research in Developmental Disabilities*, 38, 145–160. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2014.12.026>
- Klingberg, T., Fernell, E., Olesen, P. J., Johnson, M., Gustafsson, P., Dahlström, K., Gillberg, C. G., Forsberg, H., & Westerberg, H. (2005). Computerized training of working memory in children with ADHD – a randomized, controlled trial. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 44(2), 177–186. <https://doi.org/10.1097/00004583-200502000-00010>
- Kok, L., van der Waa, A., Klip, H., & Staal, W. (2016). The effectiveness of psychosocial interventions for children with a psychiatric disorder and mild intellectual disability to borderline intellectual functioning: A systematic literature review and metaanalysis. *Clinical Child Psychology and Psychiatry*, 21(1), 156–171. <https://doi.org/10.1177/1359104514567579>
- Koslowski, N., Klein, K., Arnold, K., Kösters, M., Schützwahl, M., Salize, H. J., & Puschner, B. (2016). Effectiveness of interventions for adults with mild to moderate intellectual disabilities and mental health problems: Systematic review and meta-analysis. *The British Journal of Psychiatry: The Journal of Mental Science*, 209(6), 469–474. <https://doi.org/10.1192/bjp.bp.114.162313>
- Lachapelle, Y., McKinnon, D. S., Boisvert, C. C., & Lévesque, S. (2002). C'est mon avenir après tout? *Revue Européenne du Handicap Mental* (pp. 4–14).
- Lanfranchi, S., Jerman, O., Dal Pont, E., Alberti, A., & Vianello, R. (2010). Executive function in adolescents with Down Syndrome. *Journal of Intellectual Disability Research: JIDR*, 54(4), 308–319. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2788.2010.01262.x>

- Lichtenstein, P., Tideman, M., Sullivan, P., Serlachius, E., Larsson, H., Kuja-Halkola, R., & Butwicka, A. (2022). Familial risk and heritability of intellectual disability: A population-based cohort study in Sweden. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 63, 1092.
- Lindblad, I., Gillberg, C., & Fernell, E. (2011). ADHD and other associated developmental problems in children with mild mental retardation. The use of the “Five-To-Fifteen” questionnaire in a population-based sample. *Research in Developmental Disabilities*, 32(6), 2805–2809. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.05.026>
- Loranger, M., Blais, M. C., Pépin, M., & Doyon, M. (2000). Mesures de vitesse des opérations mentales chez des enfants présentant une déficience intellectuelle: Measures of speed of mental operations with children with mental retardation. *Revue francophone de la déficience intellectuelle*, 11(2), 117–127.
- Maaskant, M., van de Wouw, E., van Wijck, R., Evenhuis, H. M., & Echteld, M. A. (2013). Circadian sleep–wake rhythm of older adults with intellectual disabilities. *Research in Developmental Disabilities*, 34(4), 1144–1151. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2012.12.009>
- Maillart, C., Desmottes, L., Prigent, G., & Leroy, S. (2014). Réflexions autour des principes de rééducation proposés aux enfants dysphasiques. *ANAE : Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l’Enfant*, 26(131), 402–409.
- Maison de l’UNESCO. (2018). Les états généraux de la déficience intellectuelle. UNESCO.
- Martin, C., West, J., Cull, C., & Adams, M. (2000). A preliminary study investigation how people with mild intellectual disabilities perform on the Rivermead Behavioural Memory Test. *Journal of Applied Research in Intellectual Disabilities*, 13(3), 186–193. <https://doi.org/10.1046/j.1468-3148.2000.00018.x>
- Megalakaki, O., Yazbek, H., & Fouquet, N. (2010). Activités de catégorisation chez les enfants déficients intellectuels légers et les enfants tout-venant appariés par âge mental. *Neuropsychiatrie de l’Enfance et de l’Adolescence*, 58(5), 317–326. <https://doi.org/10.1016/j.neurenf.2009.12.006>
- Memisevic, H., & Djordjevic, M. (2018). Visual-motor integration in children with mild intellectual disability: A meta-analysis. *Perceptual and Motor Skills*, 125(4), 696–717. <https://doi.org/10.1177/0031512518774137>
- Merrill, E., Lookadoo, R., & Rilea, S. (2003). Memory, language comprehension, and mental retardation. *International Review of Research in Mental Retardation*, 27 [https://doi.org/10.1016/S0074-7750\(03\)27005-1](https://doi.org/10.1016/S0074-7750(03)27005-1)

- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex “Frontal Lobe” tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 41(1), 49–100. <https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734>
- Nouwens, P. J. G., Lucas, R., Embregts, P. J. C. M., & van Nieuwenhuizen, C. (2017). In plain sight but still invisible: A structured case analysis of people with mild intellectual disability or borderline intellectual functioning. *Journal of Intellectual & Developmental Disability*, 42(1), 36–44. <https://doi.org/10.3109/13668250.2016.1178220>
- Nouwens, P. J. G., Smulders, N. B. M., Embregts, P. J. C. M., & van Nieuwenhuizen, C. (2017). Meeting the support needs of persons with mild intellectual disability or borderline intellectual functioning: Still a long way to go. *Journal of Intellectual Disability Research: JIDR*, 61(12), 1104–1116. <https://doi.org/10.1111/jir.12427>
- Nouwens, P. J. G., Smulders, N. B. M., Embregts, P. J. C. M., & van Nieuwenhuizen, C. (2020). Differentiating care for persons with mild intellectual disability or borderline intellectual functioning: A Delphi study on the opinions of primary and professional caregivers and scientists. *BMC Psychiatry*, 20(1), 57. <https://doi.org/10.1186/s12888-020-2437-4>
- Orsini-Bouichou, F. (1982). *L’intelligence de l’enfant : ontogenèse des invariants*. Marseille: CNRS.
- Orsolini, M., Melogno, S., Scalisi, T. G., Latini, N., Caira, S., Martini, A., & Federico, F. (2019). Training verbal working memory in children with mild intellectual disabilities: Effects on problem-solving. *Psicología Educativa. Revista de los Psicólogos de la Educación*, 25(1), 1–11.
- Ottersen, J., & Grill, K. M. (2015). Benefits of extending and adjusting the level of difficulty on computerized cognitive training for children with intellectual disabilities. *Frontiers in Psychology*, 6 <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01233>
- Owen, A. L., & Wilson, R. R. (2006). Unlocking the riddle of time in learning disability. *Journal of Intellectual Disabilities: JOID*, 10(1), 9–17. <https://doi.org/10.1177/1744629506062269>
- Paour, J. L. (1975). Effet d’un entraînement cognitif sur la compréhension et la production d’énoncés passifs chez des enfants déficients mentaux. *Etudes de Linguistique Appliquée*, 20, 88.

- Perret, P. (2016). Accompagner le développement de l'intelligence : Les pratiques d'éducation et de remédiation cognitive. *Enfance*, 1(1), 85–111.
<https://doi.org/10.3917/enf1.161.0085>
- Perret, P., & Bailleux, C. (2019). Chapitre 10. Les pratiques de remédiation cognitive en psychologie développementale. In 12 interventions en psychologie du développement. pp. 217–237. Dunod. <https://doi.org/10.3917/dunod.brun.2019.03.0217>
- Petitpierre, G. (2017). Chapitre 11. La personne polyhandicapée, son développement et ses apprentissages. pp. 249–260. Dunod.
<https://doi.org/10.3917/dunod.ponso.2017.01.0249>
- Petitpierre, G. (2021). Chapitre 11. La personne polyhandicapée, son développement et ses apprentissages. In *La personne polyhandicapée: Vol (2eéd, pp. 249–261)*. Dunod.
<https://doi.org/10.3917/dunod.colle.2021.01.0249>
- Petitpierre, G., Gremaud, G., & Veyre, A. (2014). Les apprentissages à l'âge adulte, qu'en disent les personnes avec une déficience intellectuelle. Université de Fribourg, EESP.
- Petitpierre, G., & Rolfo, A. (2019). Chapitre 4. Les interventions éducatives dans le champ du polyhandicap. In 12 interventions en psychologie du développement. pp. 79–98. Dunod. <https://doi.org/10.3917/dunod.brun.2019.03.0079>
- Petitpierre, G., & Squillaci, M. (2020). Pédagogie et polyhandicap : Quels enjeux et conditions pour l'apprentissage de la personne polyhandicapée ? *La nouvelle revue - Éducation et société inclusives*, (88), 51. <https://doi.org/10.3917/nresi.088.0051>
- Piaget, J. (1923). La pensée symbolique et la pensée de l'enfant. *Archives de psychologie*.
- Rattat, A.-C., & Collié, I. (2020). Duration judgments in children and adolescents with and without mild intellectual disability. *Heliyon*, 6(11), e05514.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05514>
- Raven. (1998). *Matrices progressives de Raven*. Paris: ECPA.
- Reichenberg, A., Cederlöf, M., McMillan, A., Trzaskowski, M., Kapra, O., Fruchter, E., & Lichtenstein, P. (2016). Discontinuity in the genetic and environmental causes of the intellectual disability spectrum. *Proceedings of the National Academy of sciences*, 113(4), 1098–1103.
- Riemersma, I., van Santvoort, F., Janssens, J. M. A. M., Hosman, C. M. H., & van Doesum, K. T. M. (2015). 'You are Okay': A support and educational program for children with mild intellectual disability and their parents with a mental illness: study protocol of a quasi-experimental design. *BMC Psychiatry*, 15, 318. <https://doi.org/10.1186/s12888-015-0698-0>

- Rodenburg, R., Benjamin, A., Meijer, A. M., & Jongeneel, R. (2009). Eye movement desensitization and reprocessing in an adolescent with epilepsy and mild intellectual disability. *Epilepsy & Behavior: E&B*, 16(1), 175–180.
<https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2009.07.015>
- Roth, B., Becker, N., Romeyke, S., Schäfer, S., Domnick, F., & Spinath, F. M. (2015). Intelligence and school grades: A meta-analysis. *Intelligence*, 53, 118–137.
<https://doi.org/10.1016/j.intell.2015.09.002>
- Salbreux, R., & Misès, R. (2005). La notion de déficience intellectuelle et ses applications pratiques. *Contraste*, 22–23(1–2), 23–47. <https://doi.org/10.3917/cont.022.0023>
- Schlatter, C. (1999). *Le Test d'Apprentissage de la Pensée Analogique*. Fondation théorique et empirique d'un outil d'évaluation pour personnes présentant un retard mental modéré. Thèse de doctorat. Geneva, Switzerland: University of Geneva.
- Schuiringa, H., van Nieuwenhuijzen, M., de Castro, B. O., & Matthys, W. (2017). Executive functions and processing speed in children with mild to borderline intellectual disabilities and externalizing behavior problems. *Child Neuropsychology*, 23(4), 442–462. <https://doi.org/10.1080/09297049.2015.1135421>
- Seguin, C., Habib, M., Krasny-Pacini, A., Lefebvre, C., Majerus, S., Peyroux, E., & Roy, A. (2018). *Rééducation cognitive chez l'enfant. Apport des neurosciences, méthodologie et pratiques*. Paris: De Boeck.
- Seron, X., & Van der Linden, M. (2016). *Traité de neuropsychologie clinique de l'adulte, Tome 2, 2e éd. Revalidation*. Paris: de Boeck/Sola
- Sheriff, K. A., & Boon, R. T. (2014). Effects of computer-based graphic organizers to solve one-step word problems for middle school students with mild intellectual disability: A preliminary study. *Research in Developmental Disabilities*, 35(8), 1828–1837.
<https://doi.org/10.1016/j.ridd.2014.03.023>
- Snell, M. E., Luckasson, R., Borthwick-Duffy, W. S., Bradley, V., Buntinx, W. H. E., Coulter, D. L., Craig, E. P. M., Gomez, S. C., Lachapelle, Y., Reeve, A., Schalock, R. L., Shogren, K. A., Spret, S., Tassé, M. J., Thompson, J. R., Verdugo, M. A., Wehmeyer, M. L., & Yeager, M. H. (2009). Characteristics and needs of people with intellectual disability who have higher IQs. *Intellectual and Developmental Disabilities*, 47(3), 220–233. <https://doi.org/10.1352/1934-9556-47.3.220>
- Söderqvist, S., Nutley, S. B., Ottersen, J., Grill, K. M., & Klingberg, T. (2012). Computerized training of non-verbal reasoning and working memory in children with intellectual disability. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6

<https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00271>

- Spencer-Smith, M., & Klingberg, T. (2015). Benefits of a working memory training program for inattention in daily life: A systematic review and meta-analysis. *PLoS One*, 10(3), e0119522. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119522>
- Szekeres, A. (2014). Social integration of children with mild intellectual disabilities in the primary school. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 116, 1855–1860. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.483>
- Thomas MS, Annaz D, Ansari D, Scerif G, Jarrold C, Karmiloff-Smith A. Using developmental trajectories to understand developmental disorders. *J Speech Lang Hear Res*. 2009;52(2):336-58. doi: 10.1044/1092-4388(2009/07-0144). Epub 2009. PMID: 19252129.
- Tiekstra, M., Hessels, M. G. P., & Minnaert, A. E. M. G. (2009). Learning capacity in adolescents with mild intellectual disabilities. *Psychological Reports*, 105(3), 804–814. <https://doi.org/10.2466/PRO.105.3.804-814>
- Treillet, V., Jourdan-Ionescu, C., & Blanchette, I. (2014). Compréhension des émotions et inhibition chez des enfants avec ou sans déficience intellectuelle. *Revue francophone de la déficience intellectuelle*, 25, 97–115. <https://doi.org/10.7202/1028216ar>
- Tymchuk, A., Lakin, K., & Luckasson, R. (2001). *The forgotten generation: The status and challenges of adults with mild cognitive limitation*. Baltimore: Brookes: Université de Fribourg, EESP.
- Van den Bos, K. P., Nakken, H., Nicolay, P. G., & van Houten, E. J. (2007). Adults with mild intellectual disabilities: Can their reading comprehension ability be improved? *Journal of Intellectual Disability Research: JIDR*, 51(Pt 11), 835–849. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2788.2006.00921.x>
- Van der Molen, M. J., Van Luit, J. E. H., Jongmans, M. J., & Van der Molen, M. W. (2007). Verbal working memory in children with mild intellectual disabilities. *Journal of Intellectual Disability Research: JIDR*, 51(Pt 2), 162–169. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2788.2006.00863.x>
- Van der Molen, M. J., Van Luit, J. E. H., Jongmans, M. J., & Van der Molen, M. W. (2009). Memory profiles in children with mild intellectual disabilities: Strengths and weaknesses. *Research in Developmental Disabilities*, 30(6), 1237–1247. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2009.04.005>
- Van der Molen, M. J., Van Luit, J. E. H., Van der Molen, M. W., Klugkist, I., & Jongmans, M. J. (2010). Effectiveness of a computerised working memory training in adolescents

- with mild to borderline intellectual disabilities: Working memory training in M-BID. *Journal of Intellectual Disability Research*, 54(5), 433–447.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2788.2010.01285.x>
- Van Tilborg, A., Segers, E., van Balkom, H., & Verhoeven, L. (2018). Modeling individual variation in early literacy skills in kindergarten children with intellectual disabilities. *Research in Developmental Disabilities*, 72, 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.ridd.2017.10.017>
- Van Nieuwenhuijzen, M., & Vriens, A. (2012). (Social) cognitive skills and social information processing in children with mild to borderline intellectual disabilities. *Research in Developmental Disabilities*, 33(2), 426–434.
<https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.09.025>
- Wan, Y.-T., Chiang, C.-S., Chen, S. C.-J., & Wuang, Y.-P. (2017). The effectiveness of the computerized visual perceptual training program on individuals with Down syndrome: An fMRI study. *Research in Developmental Disabilities*, 66, 1–15.
<https://doi.org/10.1016/j.ridd.2017.04.015>
- Wechsler, D. (1939). The measurement of adult intelligence. *The Journal of Nervous and Mental Disease*, 91(4), 548.
- Wechsler, D., & Naglieri, J. A. (2009). *Wechsler Nonverbal Scale of Ability*. Paris: ECPA.
- Weisz, J. (1990). Cultural-familial mental retardation: A developmental perspective on cognitive performance and “helpless” behavior. In R. Hodapp, J. Burack, & E. Zigler (Eds.), *Issues in the developmental approach to mental retardation* (pp. 137–168). Cambridge: Cambridge University Press.
- Wuang, Y.-P., Wang, C.-C., Huang, M.-H., & Su, C.-Y. (2008). Profiles and cognitive predictors of motor functions among early school-age children with mild intellectual disabilities. *Journal of Intellectual Disability Research: JIDR*, 52(12), 1048–1060.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2788.2008.01096.x>
- Yaqoob, M., Bashir, A., Zaman, S., Ferngren, H., Von Döbeln, U., & Gustavson, K.-H. (2004). Mild intellectual disability in children in Lahore, Pakistan: Aetiology and risk factors. *Journal of Intellectual Disability Research: JIDR*, 48(Pt 7), 663–671.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2788.2003.00573.x>
- Zagaria, T., Antonucci, G., Buono, S., Recupero, M., & Zoccolotti, P. (2021). Executive functions and attention processes in adolescents and young adults with intellectual disability. *Brain Science*, 11(1), 42. <https://doi.org/10.3390/brainsci11010042>

- Zikl, P., Zajickova, B., & Tomaskova, M. (2012). Functional motor abilities of the upper extremities in children with mild intellectual disabilities. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 69, 2068–2075. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.12.166>
- Zikl, P., Šilhánková, L., & Manženová, M. (2013). Security in the internet environment for children with mild intellectual disabilities. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 106, 2348–2353. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.12.269>
- Zikl, P., Havlíčková, K., Holoubková, N., Hrníčková, K., & Volfová, M. (2015). Mathematical literacy of pupils with mild intellectual disabilities. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 174, 2582–2589. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.01.936>
- World Health Organization. (1993). ICD 10 International Classification of Diseases 10th Revision. The global standard for diagnostic health information.
- World Health Organization. (2020). ICD-11 International Classification of Diseases 11th Revision. The global standard for diagnostic health information.

Tableau 1. Synthèse des études sur les troubles cognitifs dans la DIL classées par domaine cognitif (i.e. Langage, Mémoire, Motricité, Fonctions exécutives, Catégorisation, Perception)

Étude	Type de comparaison	Population	Domaine d'étude	Principaux résultats
van Tilborg, Segers, van Balkom, et Verhoeven (2018)	AC	53 enfants DIL et 74 tout-venants âgés entre 5 et 7 ans QI compris entre 50 et 71 Absence de comorbidités et étiologies connues Pays-Bas	Langage	Il existe un retard de conscience phonologique qui freine l'accès à l'alphabétisation chez les enfants DIL.
*Di Blasi, Buono, Cantagallo Di Filippo, et Zoccolotti (2019)	Absence de groupe contrôle	106 enfants DIB et 168 enfants DIL âgés de 7 à 14 ans Absence de comorbidités et étiologies connues QI compris entre 50 et 70 pour les DIL Italie	Langage	Les capacités de lecture des enfants porteurs de DIL sont variables avec traitement lexical déficitaire (i.e., représentations lexicales orthographiques)
Barton-Hulsey, Sevcik et Ronski (2017)	AC	102 enfants DI QI compris entre 44 et 90 (DIL/B) âgés de 7 à 12 ans Toutes étiologies et comorbidités confondues Etats-Unis	Langage	Les compétences linguistiques sont de bons prédicteurs de la compréhension de la lecture chez les enfants DIL.
Merril, Lookadoo et Rilea (2003)	Article descriptif de plusieurs études avec des appariements sur l'AC et/ou l'AM	Adolescents DIL QI entre 50 et 70	Mémoire	Il existe une dissociation chez les adolescents DIL avec d'une part des difficultés dans les apprentissages explicites impliquant un coût cognitif élevé, et d'autre part une préservation des capacités d'apprentissages implicites.
Martin, West, Cull et Adams (2000)	Absence de groupe contrôle	20 adultes DIL âgés de 19 à 58 ans Toutes étiologies confondues QI entre 55 et 75	Mémoire	Les résultats suggèrent que la détérioration de la mémoire surviendrait plus tôt chez les personnes présentant une déficience intellectuelle légère que dans la population normale.
Megalakaki, Yazbek et Fouquet (2010)	AM	30 enfants DIL âgés de 8 à 15 ans et 30 enfants tout-venant âgés de 4 à 7 ans QI compris entre 50 et 67 Pas d'information sur les étiologies et comorbidités France	Catégorisation	Les capacités de catégorisation d'enfants porteurs de DIL sont comparables à celles de sujets normaux-typiques.
Hayes et Conway (2014)	AM	35 enfants DIL âgés de 9 à 14 ans et 20 tout-venants âgés de 8 à 10 ans QI compris entre 50 et 75 Pas d'information sur les étiologies et comorbidités Australie	Catégorisation	Les enfants porteurs de DIL ne présentent pas de difficulté à abstraire un prototype de catégorie, mais leur utilisation d'informations spécifiques à l'exemple pour la reconnaissance est plus faible que des sujets tout-venants.
Wuang, Wang, Huang, et Su (2008)	Absence de groupe contrôle	233 enfants DIL âgés entre 7 et 8 ans QI compris entre 54 et 61 Absence de comorbidités et étiologies connues Taïwan	Motricité	Il existe des troubles de la motricité fine, globale, et de l'intégration sensorielle (i.e. discrimination et recherche sensorielle) chez les enfants porteurs de DIL.
Zikla, Zajickovab, et Tomaskovac (2012)	AC	41 enfants porteurs de DIL et 41 enfants tout-venant âgés en moyenne de 10 ans	Motricité	Il existe des difficultés dans l'utilisation des extrémités supérieures des membres (i.e. mains) d'enfants DIL sur des tests standardisés d'ergo-diagnostic.

		<p>QI compris entre 50 et 69 Pas d'information sur les étiologies et comorbidités République tchèque</p>		
Carmeli, Bar-Yossef, Ariav, et Levy, Liebermann (2008)	AC	<p>42 adultes DIL et 48 adultes tout-venants âgés de 31 à 49 ans QI compris entre 62 et 79 Exclusion des troubles neurologiques et sensoriels Israël</p>	Motricité	Il existe un déficit du contrôle moteur chez les sujets porteurs de DIL (i.e. coordination motrice) et ce en raison de difficultés d'intégration des informations perceptives dans l'action motrice.
Memisevic et Djorjevic (2018)	Méta-analyse 10 études AC	<p>Enfants DIL âgés entre 0 et 18 ans QI compris entre 57 et 73 Serbie</p>	Perception Visuo-motricité	Les enfants porteurs de DIL ont des déficits dans les capacités d'intégration visuo-motrice.
Danielsson, Henry, Messer et Rönnberg (2012)	AC et AM	<p>66 enfants : 22 DIL (12-15 ans), 22 appariés en AC (11-14 ans) et 22 appariés en AM (6-8 ans) QI compris entre 70 et 75 Pas d'information sur les étiologies et comorbidités Suède</p>	Fonctions exécutives	Les enfants porteurs de DIL présentent des difficultés d'inhibition, de planification et de mémoire de travail non verbale par rapport au groupe apparié en AM. En revanche, les capacités de flexibilité mentale semblent préservées. En comparaison avec le groupe apparié en AC, les performances des enfants sont toujours inférieures.
Loranger, Blais, Pépin et Doyon (2000)	Pas de groupe contrôle	<p>62 enfants âgés de 3 à 13 ans porteurs de DIL ou DI modérée QI compris entre 42 et 68 Pas d'information sur les étiologies et comorbidités Canada</p>	Fonctions exécutives Vitesse traitement de l'information	Un ralentissement psychomoteur est associé à un QI plus faible.
Zagaria, Antonucci, Buono, Recupero, et Zoccolotti (2021)	AC	<p>27 adolescents âgés de 15 à 23 ans DIL QI compris entre 50 et 70 Absence de comorbidités et étiologies connues Italie</p>	Fonctions exécutives Attention	Il existe des difficultés attentionnelles en plus des fragilités exécutives chez les adolescents DIL. Ces difficultés seraient spécifiquement observées dans des conditions d'attention faisant appel à l'interférence ou au déplacement de l'attention.
Gligorovic et Buha Durovic (2014)	Pas de groupe contrôle	<p>53 enfants DIL âgés de 10 à 14 ans QI compris entre 50 et 70 Absence de comorbidités et étiologies connues Serbie</p>	Fonctions exécutives Inhibition	Il existe un déficit spécifique du contrôle inhibiteur associé à la DIL.
Grada et Simoni (2018)	Pas de groupe contrôle	<p>10 enfants porteurs de DIL âgés de 4 à 7 ans et 5 enfants TDAH âgés de 7 à 11 ans QI compris entre 52 et 69 Exclusion des troubles neurologiques et des comorbidités psychiatriques Italie</p>	Fonctions exécutives Inhibition	Un déficit spécifique du contrôle inhibiteur est associé à la DIL.
Treillet, Jourdan-Ionescu et Blanchette (2014)	AM	<p>17 enfants porteurs de DIL ou DIM (9 – 13 ans) et 17 enfants tout-venant (6-8 ans) Absence de comorbidités et étiologies connues Pas d'information sur le QI Canada</p>	Fonctions exécutives Inhibition	Les enfants DIL présentent un même niveau global de compréhension des émotions mais ne mobilisent pas leurs ressources inhibitrices de la même manière (i.e. inhibition émotionnelle préservée et inhibition comportementale déficitaire).
*Bexkens, Jansen, Van der Molen et Huizenga (2016)	AC	<p>479 adolescents âgés de 12 à 18 ans 103 avec troubles du comportements, 152 avec DIL ou DIB, 118 avec DIL/B + troubles du comportement et 106 tout-venants QI compris entre 66 et 79 Pas d'information sur les étiologies</p>	Fonctions exécutives Prise de décision	Les capacités de prise de décision dans la DIL seraient altérées dans des situations émotionnelles non intenses, et ce en lien avec un contrôle émotionnel déficitaire.

		Comorbidités évaluées Pays-Bas		
*Schuiringa, van Nieuwenhuijzen, Orobio de Castro, et Matthys (2017)	Pas de groupe contrôle	71 enfants DIL/B avec des troubles du comportement et 71 enfants DIL/B sans troubles du comportement âgés de 9 à 16 ans QI compris entre 55 et 85 Exclusion des TSA et des enfants dont les parents présentaient des antécédents médicaux psychiatriques ou sensoriels Pays-Bas	Fonctions exécutives Inhibition	Les troubles du comportement extériorisés des personnes DIL sont corrélés avec l'altération des capacités d'inhibition.
Van der Molen, Van Luit, Jongmans, et Van der Molen (2007)	AM et AC	50 enfants DIL âgés de 13 à 17 ans, 25 appariés en AM âgés de 8 à 12 ans et 25 appariés en AC QI compris entre 55 et 85 Absence de comorbidités et étiologies connues Pays-Bas	Fonctions exécutives Mémoire de travail	Les performances des enfants DIL sont comparables à celles du groupe apparié sur l'AM. En revanche, en comparaison avec le groupe apparié sur l'AC, le stockage via la boucle phonologique est déficitaire, tandis que le mécanisme d'autorépétition subvocale est intact
Van der Molen, Van Luit, Jongmans, et Van der Molen (2009)	AC et AM	49 enfants DIL âgés entre 13 et 17 ans, 39 enfants appariés sur l'AC et 29 enfants appariés sur l'AM (8-12 ans) QI compris entre 50 et 70 Absence de comorbidités et étiologies connues Pays-bas	Fonctions exécutives Mémoire de travail et mémoire à court terme	Les résultats montrent des performances déficitaires dans toutes les tâches de MCT et de MDT, en comparaison avec un groupe apparié en AC. Lorsque l'on s'intéresse au groupe apparié en AM on retrouve deux dissociations : une préservation de la MCT avec atteinte de la MDT, et une altération du traitement en modalité verbale contrairement à la modalité visuospatiale qui est intacte.
*Bruns, Ehl, et Grosche (2018)	AC	87 enfants DIL/B âgés de 7 à 17 ans et 123 tout-venants âgés de 6 à 14 ans QI compris entre 55 et 85 Absence de comorbidités et étiologies connues Allemagne	Fonctions exécutives Mémoire de travail	Les enfants atteints de DIL présentent un retard dans le développement de la capacité de la boucle phonologique et de la répétition subvocale et ne le rattrapent pas au cours du développement.
Japundza-Milisavljevic et Macesic-Petrovic (2008)	Pas de groupe contrôle	124 enfants DIL âgés de 8 à 16 ans QI compris entre 50 et 69 Absence de comorbidités et étiologies connues Serbie	Fonctions exécutives Résolution de problèmes	Il existe des difficultés dans les tâches qui requièrent l'utilisation de stratégies de résolution de problème chez les enfants porteurs de DIL.
*Hartman, Houwen, Scherder, et Visscher (2010)	AC et sexe	61 enfants DIB (QI compris entre 71 et 79) ans, 36 enfants DIL âgés de XX ? (QI compris entre 54 et 70), 97 enfants tout-venant appariés en sexe, tous âgés de 7 à 12 ans ? Exclusion TSA et TDAH Pays-Bas	Fonctions exécutives	Les enfants porteurs de DIL présentent non seulement des déficiences motrices qualitatives mais aussi des déficiences dans les fonctions exécutives supérieures.
*Bexkens, Van der Molen, Annematt, Collot d'Escury-Koenigs et Huizenga (2013)	AC	82 enfants âgés de 14 à 16 ans 23 DIL/B + troubles du comportement, 19 DIL/B sans troubles du comportement, 18 troubles du comportement et 22 tout-venants QI compris entre 55 et 85 Pays-bas	Fonctions exécutives Inhibition	Mise en évidence d'un impact de la DIL sur le contrôle des interférences dans une tâche cognitive, non retrouvé dans les évaluations du fonctionnement exécutif quotidien (BRIEF : Behavioral Rating Inventory of Executive Function) pourtant plus écologiques.
Rattat et Collié (2020)	AC	63 DIL âgés de 11 à 19 QI compris entre 50 et 74 Absence de comorbidités et étiologies connues France	Estimation temporelle	Les performances d'estimation de durées sont altérées chez les participants porteurs d'une DIL, suggérant que leur capacité à estimer les durées se développe à un rythme plus lent.

*AC = Age chronologique, AM = Age mental

A retenir

- Il existe de nombreuses difficultés cognitives associées au TDIL notamment dans l'estimation des durées et les FE. Aucune étude n'a investigué les capacités de VTI dans cette population spécifique mais des travaux montrent qu'un QI faible serait associé à un ralentissement du traitement de l'information.
- L'étiologie et la présence de comorbidités modulent le tableau clinique du TDIL. Ils constituent donc des éléments centraux dans la compréhension des difficultés observées dans le TDIL et le choix d'un accompagnement spécifique.
- Bien qu'ils soient multiples, les entraînements cognitifs destinés aux individus porteurs d'un TDIL ne sont généralement pas adaptés aux spécificités de cette population. Ils comportent des limitations méthodologiques et montrent plus ou moins de bénéfices, et de transfert selon les programmes. De nouvelles pistes d'accompagnement tenant compte des recommandations adaptées au TDIL sont nécessaires.
- Les recommandations pour mettre en place un entraînement cognitif efficace auprès d'un public porteur d'un TDIL sont : des séances d'entraînement courtes pour favoriser la concentration, un contenu ludique pour favoriser la motivation, utiliser la métacognition pour aider l'individu à identifier ses stratégies d'apprentissage de manière active, proposer un étayage et s'ajuster au niveau de l'individu pour valoriser la confiance en soi et s'inscrire dans la zone proximale de développement, proposer des activités mobilisant plusieurs habilités cognitives, sociales et émotionnelles afin de faciliter le transfert aux activités du quotidien.
- Les enjeux pour le bien-être des individus porteurs de TDIL est à la fois de mieux définir leur profil cognitif et comportemental, mieux diagnostiquer ce trouble en utilisant des outils adaptés et de mieux les accompagner en utilisant des interventions adaptées.

Conclusion

Ce premier travail de revue met en évidence que le TDIL est une pathologie neurodéveloppementale associée à de nombreuses difficultés cognitives, notamment d'estimation des durées, exécutives et de VTI. Le chapitre qui suit s'attachera donc à définir l'estimation des durées, et à dresser une synthèse des capacités d'estimation temporelle et de leur développement durant l'enfance et l'adolescence, tant dans le développement typique qu'atypique, et plus spécifiquement dans le TDIL.

Chapitre 2 : L'estimation des durées

2.1 Définition, évaluation et modèle théorique

Le temps est une notion complexe qui guide le comportement adaptatif de l'Homme et qui lui est donc nécessaire pour appréhender son environnement (Zakay, 2012). Dès l'antiquité, les philosophes comme Saint Augustin par exemple, se demandaient comment définir le temps et exposaient la difficulté à caractériser et représenter ce concept (Confessions, XI). Les physiciens ont ensuite cherché à en identifier les propriétés passant d'un concept unique et linéaire (Newton, 1687) à un concept relatif à un référentiel (Einstein, 1905). Ce sont finalement les psychologues qui ont cherché à distinguer le temps dit objectif ou mesurable du temps dit subjectif qui correspond à l'estimation du temps objectif. En 1982, Friedman identifie plusieurs caractéristiques qui doivent être maîtrisées de manière consciente pour appréhender le temps : la succession qui renvoie au séquençage des éléments, la durée qui correspond à un intervalle de temps et l'ordre qui correspond à la chronologie des faits. À partir de ces éléments, l'estimation des durées serait : « une faculté présente bien précocement à l'élaboration du concept abstrait d'intervalle de temps. Il s'agirait plutôt d'un "sentiment spécifique", un "élément de la représentation" de la durée, qui est en lien avec la mémoire » (Barreau, 2009). Pour ce travail de thèse nous nous centrerons précisément sur cette capacité d'estimation des durées. En effet, elle est mobilisée dans notre quotidien pour se représenter la durée d'une activité au quotidien, par exemple se laver les dents, regarder une vidéo ou encore s'habiller le matin, mais également pour effectuer des activités plus complexes telles que planifier des événements ou anticiper des trajets. Ces habiletés temporelles sont essentielles à l'Homme et se développent fortement durant la période de l'enfance (pour des revues récentes, voir Droit-Volet, 2022; Hallez, 2020)

2.1.1 L'évaluation de l'estimation des durées

Pour étudier les capacités d'estimation des durées, plusieurs types de tâches sont utilisés. Ces tâches peuvent reposer sur une méthodologie prospective dans laquelle le sujet sait explicitement à l'avance qu'il va devoir estimer une durée, et aurait donc recours à un mécanisme interne de mesure du temps, ou bien sur une méthodologie rétrospective dans laquelle cette information n'est pas explicitement donnée avant la tâche, mobilisant ainsi davantage des processus mnésiques (Block & Zakay, 1997). Les tâches dites prospectives sont

les plus couramment utilisées dans les études et peuvent prendre plusieurs formats : les tâches de comparaison de durées dans lesquelles le sujet doit comparer la durée de plusieurs stimuli (e.g., discrimination, généralisation, bissection), les tâches de production de durées dans lesquelles le sujet doit produire un intervalle d'une durée déterminée, les tâches de reproduction de durées dans lesquelles le sujet doit reproduire un intervalle cible préalablement présenté, ou encore les tâches d'estimation verbale des durées dans lesquelles le sujet doit exprimer une durée écoulée en utilisant des unités temporelles conventionnelles comme les secondes ou les minutes (Taatgen et al., 2007; Wearden, 2016). Parmi cet ensemble de tâches, les tâches de bissection et de reproduction ont été particulièrement utilisées dans les études chez l'enfant (e.g., Droit-Volet & Zélanti, 2013; Gautier & Droit-Volet, 2002; Hallez, 2020; Hallez & Droit-Volet, 2017; Rattat & Chevalier, 2020; Rattat & Collié, 2020), c'est pourquoi nous avons fait le choix d'utiliser dans nos recherches les versions de ces 2 tâches proposées par Droit-Volet et al. (2015). Ces versions présentent l'avantage d'utiliser des données courtes (de l'ordre des ms), ce qui permet d'éviter les stratégies de comptage qui mobilisent d'autres processus cognitifs. En effet, le comptage est une stratégie mise en place spontanément par l'individu lorsqu'on lui demande d'estimer une durée (Fraisse, 1963). Or, cela conduit d'une part à des estimations plus précises et moins variables et cela génère d'autre part une violation de la propriété scalaire fondamentale de la variance (Rattat & Droit-Volet, 2012). D'autre part, la passation de ces tâches dure une vingtaine de minutes, ce qui est plutôt court et propice à éviter de trop mobiliser les compétences attentionnelles sur la durée des jeunes participants. Dans la tâche de bissection temporelle, après avoir été exposés à deux durées de référence (une courte et une longue), les participants doivent indiquer pour chaque nouvelle durée de stimulus (courte, longue ou intermédiaire), si elle se rapproche plus de la durée de référence courte ou longue. Le participant doit appuyer sur une des deux touches du boîtier de réponse pour répondre, une touche étant associée à la durée courte et une autre à la durée longue. Dans la tâche de reproduction de durées, le participant est exposé à des stimuli cibles dont il doit ensuite reproduire la durée à l'aide d'une touche du clavier de l'ordinateur. Il doit appuyer une première fois sur la touche pour débiter la présentation du stimulus et une deuxième fois pour l'arrêter, une fois qu'il estime que la durée de présentation est similaire à la durée cible préalablement mémorisée.

Ces deux tâches n'impliquent donc pas exactement les mêmes processus cognitifs. Malgré l'hétérogénéité des résultats dans la littérature, il en ressort que la reproduction des durées serait plus exigeante sur le plan cognitif dans la mesure qu'elle mobiliserait à la fois des capacités de mise à jour en MDT, d'inhibition, de flexibilité et de VTI, tandis que la performance à la tâche de bissection temporelle serait surtout dépendante de l'inhibition et la

VTI (e.g., Droit-Volet & Zélanti, 2013; Ogden et al., 2014; Rattat & Chevalier, 2020). D'autre part, la tâche de bissection temporelle solliciterait également moins les compétences motrices que la tâche de reproduction dans la mesure où le participant appuie simplement sur une touche pour indiquer sa réponse, celle-ci étant de plus non contrainte par le temps (i.e., le sujet produit un seul appui pour donner sa réponse sans que le temps de réponse ne soit enregistré, Droit-Volet, 2010). Néanmoins, ces deux tâches impliquent un jugement des durées pouvant se baser sur un système d'horloge interne.

2.1.2 Le modèle d'horloge interne

Bien qu'il existe plusieurs modèles physiques, philosophiques, neuronaux ou comportementaux de l'estimation temporelle, le modèle de l'horloge interne reste l'un des plus cités dans la littérature et a été validé empiriquement à de multiples reprises (pour une synthèse, voir Droit-Volet, 2022; Wearden, 2016). Il a été d'abord modélisé par Treisman (1963), puis modifié à plusieurs reprises par Gibbon et ses collègues (Church & Gibbon, 1982; Gibbon et al., 1984) (Figure 1). Ce modèle repose sur la théorie du temps scalaire selon laquelle l'estimation du temps serait caractérisée par deux paramètres : la précision et la variabilité (Gibbon, 1977). Selon cette théorie, d'une part la moyenne des estimations des durées (subjectives) augmente avec l'augmentation de la durée (objective) du stimulus, ce qui signifie que l'estimation d'une durée objective est précise en moyenne. D'autre part, la variabilité du temps subjectif augmente de façon proportionnelle à la valeur de la durée à estimer. Autrement dit, il existe une relation linéaire entre l'écart-type et la moyenne de la durée subjective, de sorte que le coefficient de variation reste constant en dépit de l'allongement ou de la diminution des durées à estimer. Ainsi, lorsque le rapport entre la variabilité et la moyenne reste constant, on parle de relation scalaire, ce qui correspond à la loi de Weber (Killeen & Weiss, 1987).

Partant de cette théorie scalaire, les chercheurs ont formulé l'hypothèse d'un mécanisme propre à la mesure du temps qui s'apparenterait à une horloge interne. Le principe de ce modèle repose sur une représentation analogique de l'écoulement du temps, similaire à une horloge. Ainsi, estimer une durée serait le résultat d'un traitement hiérarchique en plusieurs niveaux de l'information temporelle. L'horloge interne constitue le premier niveau de traitement. Celle-ci est constituée d'un pacemaker émettant un flux continu d'impulsions à un rythme en moyenne constant. Le nombre d'impulsions émises pendant le stimulus dont on doit estimer la durée est ensuite enregistré par un compteur, appelé accumulateur. Cet accumulateur fonctionne grâce à

un interrupteur qui est actionné soit de manière automatique, soit de manière volontaire lorsque le sujet alloue ses ressources attentionnelles au stimulus temporel. L'interrupteur est fermé lorsque la durée du stimulus doit être estimée, laissant ainsi transiter les impulsions vers l'accumulateur. En revanche, lorsque l'interrupteur est ouvert, les impulsions ne transitent plus. Une durée subjective correspond alors au nombre d'impulsions accumulées, cette durée étant d'autant plus longue que le nombre d'impulsions est élevé. C'est le premier niveau du traitement de l'information temporelle.

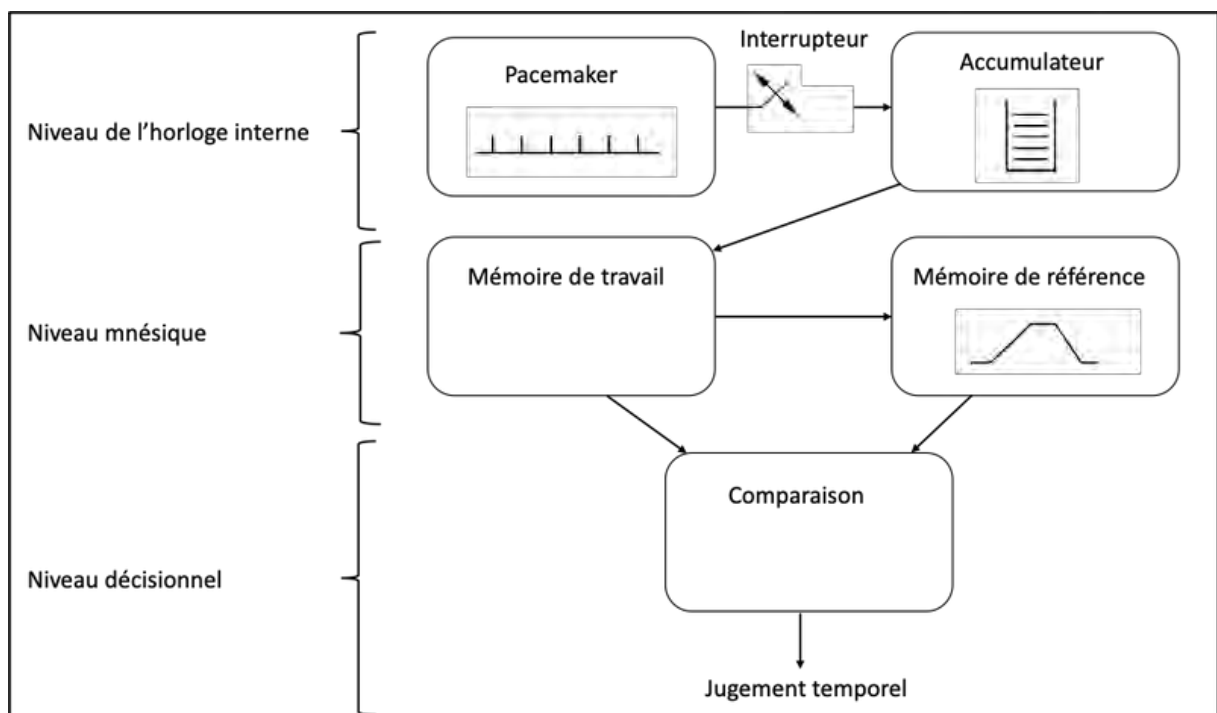


Figure 1 : Adaptation du modèle de l'horloge interne de traitement de l'information temporelle de Gibbon, Church et Meck (1984)

Le deuxième niveau de traitement, le niveau mnésique, correspond au stockage en mémoire des durées. La représentation de la durée est dans un premier temps stockée à court terme en MDT, avant d'être éventuellement stockée à plus long terme en mémoire de référence, lorsque celle-ci est pertinente pour réaliser la tâche en cours. À ces deux niveaux de traitement de l'information temporelle vient s'ajouter un troisième et dernier niveau, le niveau décisionnel. L'individu est amené à comparer une ou plusieurs durée(s) de référence (stockée(s) en mémoire de référence) à la durée en cours maintenue en MDT pour émettre un jugement temporel. Prenons l'exemple de la tâche de reproduction temporelle dans laquelle l'individu doit reproduire le plus précisément possible la durée de référence d'un stimulus précédemment

présenté. Lorsque cette durée de référence est présentée, l'individu va accumuler un certain nombre d'impulsions (niveau de l'horloge interne). Cette information transite ensuite en MDT puis en mémoire de référence (niveau mnésique). Lorsque l'individu ayant comme consigne de reproduire ensuite cette même durée, il devra alors accumuler autant d'impulsions que durant la phase de présentation préalable. Cette durée qu'il est en train de reproduire est maintenue en MDT pour être comparée à la durée de référence mémorisée. Lorsque les 2 durées lui semblent comparables, il prend la décision de stopper sa reproduction (niveau décisionnel). Dans la tâche de bissection temporelle, le processus est identique pour les deux premiers niveaux. Néanmoins, au niveau décisionnel, le participant est encouragé à comparer la durée en cours avec les 2 durées de référence stockées à long terme afin de déterminer de laquelle elle est la plus proche. Chaque élément du modèle d'horloge interne peut ainsi rendre compte à la fois des distorsions temporelles, c'est-à-dire des estimations incorrectes de la durée objective (sous- ou surestimations), et des changements dans la variabilité temporelle intra-individuelle et au cours du développement (Droit-Volet et al., 2001). Au premier niveau de l'horloge, les distorsions peuvent être dues à des variations de la vitesse du pacemaker (si la vitesse varie, deux événements de même durée pourront être perçus comme ayant des durées différentes) ou de l'interrupteur (si l'intervalle entre l'ouverture et la fermeture de l'interrupteur varie, le temps perçu pourra être impacté) ; au niveau mnésique un dysfonctionnement de la mémoire de travail ou de référence peut perturber le maintien de la durée de référence ou de la durée cible et donc générer des erreurs de comparaisons ; enfin au niveau décisionnel, les distorsions seraient en lien avec des variations au niveau des seuils de prise de décision (pour une revue voir, Droit-Volet & Wearden, 2003).

2.2 L'estimation des durées dans le développement typique

L'estimation du temps a fait particulièrement l'objet d'études chez les enfants depuis une vingtaine d'années (pour une revue récente, voir Droit-Volet & Monier, 2024). Dès ses premiers mois de vie, à travers ses expériences motrices et sensorielles, le bébé expérimente la durée d'évènements et montre des capacités pour l'estimer (Brannon et al., 2007; de Hevia et al., 2014), pour détecter des atypies dans le rythme du langage (e.g., Trehub et al., 1993), ou encore adapter son rythme de succion à une musique (e.g., Bobin-Bègue et al., 2006). Avant 4 ans, les enfants ne pensent pas le temps, ils le vivent sans pouvoir se le représenter comme une référence de mesure des évènements (Droit-Volet, 2000). Toutefois, même s'ils n'en sont pas conscients, ils présentent déjà un certain savoir-faire temporel, qui va fortement s'améliorer au cours de

l'enfance (e.g., Droit-Volet, 2013, 2016). En ce qui concerne plus spécifiquement la discrimination de durées, le nourrisson fait preuve d'une capacité à discriminer des événements de durées courtes de l'ordre de 500 ms dès 4 mois (Provasi et al., 2011) et à discriminer deux durées dont l'une est le double de l'autre dès 6 mois (Brannon et al., 2007; vanMarle & Wynn, 2006). Lors d'une tâche de bissection temporelle, la sensibilité au temps des enfants, c'est-à-dire la capacité à discriminer des durées proches, s'améliore avec l'âge essentiellement entre 3 et 8 ans, âge auquel la sensibilité au temps devient comparable à celle des adultes (e.g., Droit-Volet et al., 2001; Droit-Volet & Zélanti, 2013; Provasi et al., 2011; Zélanti & Droit-Volet, 2011). Concernant la reproduction de durées, on observe que les enfants dès 4 ans, sont capables de reproduire la durée d'actions, d'anticiper leur fin et de les comparer en fonction de leur longueur (e.g., Droit-Volet, 1998; Droit-Volet & Gautier, 2000). Cependant, comme expliqué précédemment, à cet âge ils ne sont pas encore capables de se représenter le temps et de le percevoir comme une entité abstraite, indépendante des actions (e.g., Droit-Volet & Rattat, 1999; Rattat & Droit-Volet, 2002). Par exemple, ils ne sont pas capables de transférer une durée apprise d'une action à une autre (Droit-Volet & Rattat, 1999). Comme les performances à la tâche de bissection temporelle, les capacités de reproduction des durées se développent progressivement pour atteindre un niveau comparable à celui des adultes autour de 8 ans (Droit-Volet, 2010; Droit-Volet et al., 2001, 2007). Les moins bonnes performances dans une tâche de reproduction ou de bissection temporelle correspondent soit à des distorsions temporelles (précision temporelle) soit à une moins bonne sensibilité au temps (variabilité temporelle). On parle de distorsions pour désigner une surestimation (une durée jugée plus longue qu'elle ne l'est objectivement) ou une sous-estimation (une durée jugée plus courte qu'elle ne l'est objectivement) qui peuvent être automatiques ou contrôlées. Des distorsions automatiques similaires à celles des adultes sont observées chez l'enfant. Par exemple, il existe des surestimations lorsque les paradigmes incluent une composante émotionnelle (e.g., Monier & Droit-Volet, 2018). Les distorsions contrôlées sont plus marquées chez les enfants plus jeunes que chez les enfants plus âgés et que chez les adultes. Par exemple, le temps est davantage sous-estimé chez des enfants âgés de 5 ans comparativement à des enfants de 7-8 ans et des adultes dans un paradigme de double tâche (Gautier & Droit-Volet, 2002; Hallez & Droit-Volet, 2017).

La moins bonne sensibilité au temps chez l'enfant serait due à la présence de bruit dans le traitement de l'information temporelle (Droit-Volet, 2013). En effet, ce bruit induirait un chevauchement entre les représentations des durées proches, notamment en interférant avec l'encodage en mémoire, ce qui créerait de la variabilité (Droit-Volet & Monier, 2024). Ce bruit serait en lien avec certaines compétences cognitives qui sont nécessaires pour estimer le temps

mais qui ne sont pas encore matures chez l'enfant (e.g., capacités exécutives, attentionnelles). Ainsi, le jeune enfant pour lequel les capacités exécutives ne sont pas encore matures aurait du mal à attendre et présenterait une plus forte variabilité dans ses estimations de durées que l'adulte.

Les capacités d'estimation temporelle se développent donc avec l'âge chez des enfants au développement typique jusqu'à environ 8 ans. Nous pouvons imaginer qu'il existe des distorsions et/ou une moins bonne sensibilité au temps encore plus marquées, ou bien que cette évolution est décalée dans le temps dans le développement atypique, et notamment dans le TDIL.

2.3 L'estimation des durées dans le développement atypique

Les troubles du neurodéveloppement tel que le TDIL sont généralement caractérisés par des difficultés cognitives, comme nous l'avons vu dans le Chapitre 1. Il est donc possible de postuler l'existence d'un retard ou d'un déficit dans la courbe développementale des capacités d'estimation des durées décrites chez des individus TV. Le retard implique que les individus porteurs d'un TDIL ont des performances similaires à celles des individus TV plus jeunes, et que ces difficultés sont rattrapées à l'âge adulte. En revanche, si les performances ne sont pas efficaces quel que soit l'âge et que le retard n'est jamais rattrapé, on parle alors de déficit. Bien que l'estimation des durées n'ait été que très peu investiguée dans le TDIL, plusieurs études se sont intéressées à l'estimation temporelle dans le TDI, comme nous allons le voir dans cette partie.

Des études ont établi un lien entre les capacités d'estimation du temps et le quotient intellectuel (QI) reflétant l'intelligence fluide (Haldemann et al., 2012). Les auteurs supposent, sur la base des travaux de Jensen (1982, 2006), d'une part qu'une intelligence psychométrique élevée serait associée à une VTI plus rapide, et d'autre part qu'une VTI plus rapide serait associée à un taux d'oscillations neuronales excitatrices plus élevé, permettant un encodage plus rapide des informations. Les oscillations neuronales pouvant être considérées comme une base de traitement de l'information temporelle, Rammsayer et Ulrich (2001) ont fait le parallèle entre les oscillations neuronales excitatrices et les impulsions au niveau du pacemaker dans le modèle d'horloge interne. Dans le cadre de ce modèle, plus la VTI est rapide, meilleure est la résolution temporelle, ce qui correspond à une capacité d'estimation plus précise des durées. En conséquence, les auteurs ont postulé qu'une résolution temporelle plus fine permet un

traitement plus rapide de l'information et une meilleure coordination des opérations mentales, ce qui se traduit par de meilleures performances aux tests d'intelligence psychométriques. Une modélisation par équations structurelles a été appliquée entre des modèles de résolution temporelle et l'intelligence psychométrique mesurée par les Matrices de Raven. Les résultats soutiennent que le traitement temporel est fortement corrélé à l'intelligence psychométrique (Haldemann et al., 2012). Ainsi, en suggérant que l'intelligence mesurée par le QI est associée à de meilleures performances d'estimation du temps, il est possible de supposer que le TDI qui est notamment caractérisé par un QI inférieur à la norme pourrait être associé à des difficultés de résolution temporelle et par extension de précision des estimations temporelles.

Des difficultés temporelles ont effectivement été observées chez des individus porteurs d'un TDI. On retrouve notamment de moindres capacités d'orientation, de perception et de gestion du temps (Janeslätt et al., 2008, 2009, 2010, 2019). En revanche, seule une étude a récemment mis en évidence chez des jeunes âgés de 11 à 19 ans porteurs d'un TDIL, un retard de développement d'environ la moitié de leur âge dans leurs capacités d'estimation de durées, évaluées avec une tâche de bissection temporelle (Rattat & Collié, 2020). Dans leur étude, les auteurs ont montré que la sensibilité temporelle s'améliorait entre 11 et 19 ans (moins de variabilité en grandissant), tandis que la précision des estimations était la même quel que soit l'âge, ce qui est cohérent avec de précédents travaux sur le développement typique (Droit-Volet, 2013, 2016). De plus, les performances temporelles des enfants et adolescents porteurs d'un TDIL étaient systématiquement inférieures à celles des enfants et adolescents TV de même AC, mais comparables à celles d'enfants TV plus jeunes. Chez les jeunes porteurs d'un TDIL âgés de 16 à 19 ans, le retard de développement était d'environ 8 ans. À noter que des études complémentaires auprès d'adultes porteurs d'un TDIL seraient nécessaires pour préciser s'il s'agit d'un retard ou d'un déficit. En effet, si des adultes plus âgés porteurs d'un TDIL présentent des capacités d'estimation des durées aussi efficaces que des sujets TV, cela signifierait qu'ils présentent un retard, celui-ci étant attrapé à l'âge adulte. En revanche, si leurs difficultés persistent à l'âge adulte alors on parlerait dans ce cas-là d'un déficit (Rattat & Collié, 2020).

Au regard de ces travaux, les individus porteurs d'un TDIL âgés entre 11 et 19 ans semblent présenter un retard au niveau de la sensibilité au temps (ils seraient plus variables que les individus TV), mais pas de la précision temporelle.

À retenir

- L'estimation des durées est une capacité centrale dans l'adaptation de l'Homme à son environnement qui peut être évaluée, entre autres, par des tâches de bissection temporelle ou de reproduction temporelle.
- Dans le développement typique, la capacité à estimer des durées s'améliore durant l'enfance pour atteindre un niveau comparable à celui des adultes aux alentours de 8 ans.
- Dans le TDIL, seule une étude s'est intéressée à l'estimation des durées. Les résultats révèlent des difficultés à estimer des durées en comparaison avec des individus TV qui peuvent traduire un retard ou un déficit.

Conclusion

Ce second chapitre théorique a permis de définir et conceptualiser l'estimation des durées. Le développement des capacités des individus porteurs d'un TDIL à estimer des durées semble retardé de plusieurs années. Reste à savoir si ce retard se rattrape à l'âge adulte ou bien s'il s'agit d'un déficit qui persiste. Des travaux complémentaires incluant des sujets adultes sont donc nécessaires pour statuer définitivement sur cette question du retard ou du déficit. Par ailleurs, de nombreux travaux empiriques ont mis en évidence le rôle des FE et de la VTI dans l'estimation des durées. Il est donc pertinent d'examiner dans quelle mesure ces fonctions cognitives peuvent être impliquées dans les difficultés d'estimation des durées des individus porteurs d'un TDIL. La prochaine section sera précisément consacrée aux FE ainsi qu'à la VTI et proposera des éléments de définition avant de présenter les travaux portant sur le développement typique et atypique (plus spécifiquement dans le TDIL) de ces processus cognitifs.

Chapitre 3 : Les Fonctions Exécutives et la Vitesse de Traitement de l'Information

3.1 Les fonctions exécutives

3.1.1 Définition

Malgré une multitude de définitions dans la littérature (Karr et al., 2018), les FE peuvent être définies comme des processus cognitifs de haut niveau requis pour permettre l'adaptation d'un individu à son environnement à travers la mise en œuvre d'un comportement dirigé vers un but (Luria et al., 1966 ; Van der Linden et al., 2000). Elles jouent un rôle central dans la régulation du comportement face aux exigences de son milieu (Chevalier, 2010; Friedman & Miyake, 2017) et dans les situations non-routinières nouvelles ou complexes, ou bien lorsque les compétences cognitives sont insuffisantes (Roy et al., 2012).

Leur émergence progressive est en lien avec la maturation précoce et prolongée des circuits fronto-sous-corticaux, soit les réseaux entre le cortex préfrontal et plusieurs régions sous-corticales, corticales et tentorielles. Plusieurs indicateurs, notamment l'augmentation de la myélinisation ou encore la réduction de la densité synaptique, seraient associés à l'augmentation et la complexification des connexions neuronales, suggérant la maturation de ces réseaux de l'enfance jusqu'à l'âge adulte (pour une revue, voir Petrides & Pandya, 2002). Le développement de ces réseaux est un élément central dans le développement de l'enfant ayant conduit à une multitude de modélisations théoriques, dont les modèles développementaux qui font consensus aujourd'hui (Roy, 2015).

3.1.2 La modélisation des fonctions exécutives

3.1.2.1 La structure factorielle des FE

Concernant la structure des FE, l'hypothèse de leur unicité, (c'est-à-dire l'existence d'une structure exécutive commune à l'ensemble des processus exécutifs) a été le centre de controverses dans la littérature (pour des revues, voir Best & Miller, 2010; Doebel, 2020), certaines études suggérant une conception unitaire, un fonctionnement exécutif général et indifférencié (e.g., Baddeley, 1986), et d'autres un ensemble de processus exécutifs indépendants (e.g., Chevalier, 2010; Lehto et al., 2003). Certains travaux postulent par ailleurs l'existence d'un facteur exécutif commun dans la période préscolaire qui s'individualiserait en

3 facteurs distincts (inhibition, flexibilité cognitive, et mise à jour en MDT) à partir de 6 ans (e.g., Best & Miller, 2010; Diamond, 2013; Friedman et al., 2008; Karr et al., 2018; Lee et al., 2013; Miyake et al., 2000). Diamond définit ces trois facteurs de la manière suivante (2013). L'inhibition est un processus permettant de supprimer les réponses automatiques ou dominantes et se décomposerait en 3 processus sous-jacents : la résistance à l'interférence des distracteurs, la résistance à l'interférence proactive et l'inhibition des réponses prépotentes. La flexibilité cognitive correspondrait quant à elle à la capacité à passer d'une tâche à une autre ou d'un ensemble de règles de pensée à un autre pour permettre à l'individu de s'adapter aux situations nouvelles, de gérer des concepts multiples et de modifier ses stratégies en fonction de différentes exigences. Enfin, la mise à jour en MDT reflèterait la capacité d'un individu à stocker les informations pertinentes pour une tâche en cours, mais également à les manipuler activement, les contrôler, et mettre à jour le contenu de la MDT en conséquence. On distingue une composante qui permet le maintien et la manipulation des informations en mémoire à court terme, et une composante de mise à jour qui permet le renouvellement dynamique des informations nécessaires à la tâche en cours (Baddeley, 1986). Ces 3 FE seraient des fonctions de base à partir desquelles se développeraient des fonctions de plus haut niveau que sont la planification, le raisonnement et la résolution de problèmes (Diamond, 2013).

Les travaux de l'équipe de Miyake portant sur le jeune adulte (Miyake et al., 2000; Miyake & Friedman, 2012), repris par de nombreux auteurs (Best & Miller, 2010; Demeyer et al., 2023; Diamond, 2013) ont ainsi permis la création d'un modèle à 3 facteurs (l'inhibition, la flexibilité cognitive et la mise à jour en MDT) tenant compte à la fois des aspects d'unicité et d'interdépendance. Cependant, cette structure à 3 facteurs serait remise en question au bénéfice d'un modèle à 2 facteurs entre 5 et 13 ans, puis à 3 facteurs à partir de 15 ans (Lee et al., 2013). D'autres travaux montrent des effets différents selon la tâche utilisée pour mesurer une FE cible, et ne retrouvent pas de construit commun pour chaque FE (e.g., Holmén et al., 2024; Rosales et al., 2023). Les auteurs constatent via des modélisations en réseaux que les tâches évaluant l'inhibition et la mise à jour en MDT évalueraient en réalité des conglomerats de processus cognitifs, la variance n'étant pas expliquée par une seule et même FE (Rosales et al., 2023). Par exemple, pour la mise à jour en MDT, il est probable que les tâches conçues mesurent également des composantes comme l'attention ou l'inhibition, nécessaires dans le processus de mise à jour. De la même manière, l'inhibition impliquant des ressources attentionnelles et de MDT, il est possible que les tâches désignées pour l'évaluer mesurent en réalité d'autres processus (Rosales et al., 2023). Malgré ces controverses, cette modélisation en 3 facteurs étant utilisée dans la plupart des travaux sur le développement et étant à la base de la majorité des tâches cognitives

évaluant les FE dans la littérature, elle constituera la référence théorique des FE dans ce travail de thèse.

3.1.2.2 Le modèle de Diamond (2013)

Bien qu'il existe de nombreux modèles théoriques des FE dans la littérature, nos travaux prennent appui sur le modèle développemental de Diamond (2013), car il s'inscrit dans une perspective intégrative et modulaire (Figure 2). Ce modèle converge avec l'idée d'une indifférenciation des processus exécutifs durant la petite enfance, et l'émergence progressive de facteurs indépendants au cours du développement comme décrit par Miyake et al. (2000). Tandis que l'inhibition et la mise à jour en MDT se différencieraient autour de 6 à 7 ans (Lee et al., 2013), la flexibilité se dissocierait plus tardivement, suivie par les processus plus complexes comme la résolution de problème ou la planification (Diamond, 2013).

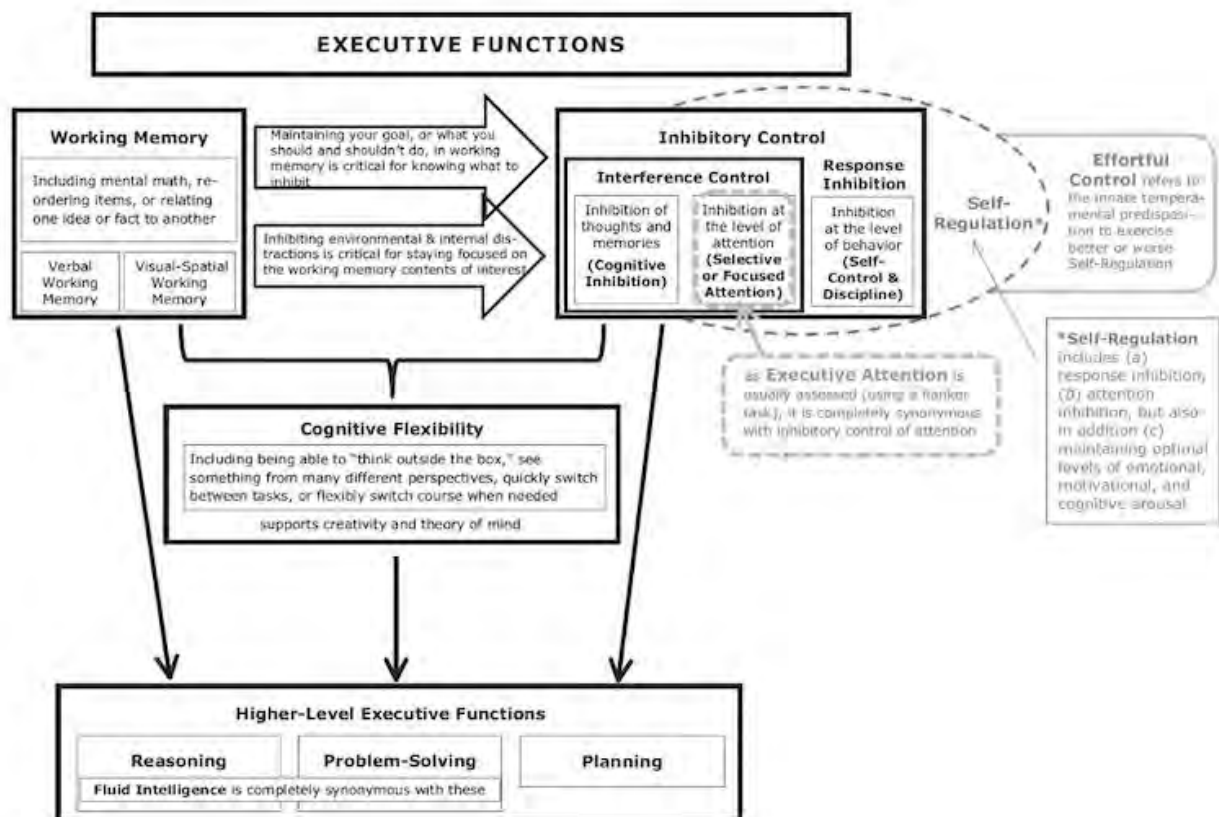


Figure 2 : Modèle intégratif issu de Diamond (2013)

Selon le modèle de Diamond (2013), il existe une relation réciproque d'interdépendance entre l'inhibition et la mise à jour en MDT ne permettant pas d'identifier laquelle précéderait

l'autre. En effet, inhiber des stimuli non pertinents serait nécessaire au maintien d'informations en MDT, et réciproquement, maintenir des informations en MDT impliquerait la sélection des stimuli pertinents à la tâche en cours et l'inhibition de ceux qui ne le sont pas (Diamond, 2013). La flexibilité cognitive se développerait à partir de ces deux processus dans la mesure l'alternance entre deux tâches nécessite également la sélection des stimuli pertinents et le maintien de ceux-ci en MDT (Diamond, 2013). Les processus de plus haut niveau (raisonnement, résolution de problèmes, planification) se formeraient ensuite à partir de ces 3 processus.

Enfin, il est intéressant dans le cadre de cette thèse de préciser que le modèle postule un lien entre l'intelligence fluide (capacité de raisonnement logique par opposition à l'intelligence cristallisée qui fait référence au raisonnement via la mobilisation des connaissances et de l'expérience) et les FE (e.g., Belacchi et al., 2010; Diamond, 2013) qui ne fait pas consensus dans la littérature (Roy, 2015). Si certains travaux ne mettent pas en évidence de lien entre l'intelligence fluide et les FE chez l'enfant (e.g., Ardila et al., 2000), d'autres en revanche montrent que les FE ne sont pas toutes reliées de la même manière à l'intelligence fluide mesurée par le QI, avec une dépendance spécifique à la MDT (e.g., Arffa, 2007; Friedman et al., 2006). Ce lien entre FE et intelligence fluide est donc encore controversé et nécessite d'être davantage investigué (Burgess et al., 2006).

3.1.2 Les difficultés d'évaluation des FE

Concernant l'évaluation des FE chez les enfants, les outils et batteries se sont multipliés ces dernières années. Les tests habituellement utilisés sont généralement des adaptations ludiques de versions destinées aux adultes, reflétant la complexité d'évaluer des fonctions cognitives dont le développement n'est pas terminé, et qui peut varier d'un individu à un autre (pour des revues, voir Roy, 2015; Roy et al., 2017). Une autre contrainte méthodologique est la difficulté à construire des tâches évaluant spécifiquement un seul et même processus exécutif. Pour garantir la fiabilité de l'évaluation des FE, il est suggéré d'utiliser plusieurs tâches évaluant un même construit et de calculer ensuite un score composite (Miyake et al., 2000; Rabbitt, 1997). Le débat sur l'existence d'une structure factorielle des FE (e.g., Rosales et al., 2023) exposé plus haut remet toutefois en question une telle méthodologie. Une autre solution est d'utiliser des batteries construites à partir des connaissances développementales de l'enfant qui tiendraient ainsi compte des stades de maturation de chaque FE (e.g., Batterie FEE, Roy et al., 2021). Les travaux de Roy et al. (2017) suggèrent également de dissocier dans l'analyse

différents paramètres comme le temps de traitement, le nombre et le type d'erreurs, afin de spécifier les difficultés rencontrées par l'enfant, ce qui constitue une richesse sur le plan clinique. Une autre source de difficulté est l'absence de consensus sur les caractéristiques d'un trouble dysexécutif chez l'enfant (Roy et al., 2017). En effet, l'hétérogénéité du développement des FE peut rapidement induire un faux positif (considérer à tort un comportement comme pathologique) ou négatif (considérer à tort un comportement comme typique). Cela renforce l'intérêt de multiplier les tâches et méthodes d'évaluation : des tests standardisés, des questionnaires comme par exemple le Behavior Rating Inventory of Executive Functions (BRIEF-vf ; Roy et al., 2013) et des données issues d'entretiens cliniques comme par exemple celui de la Young Diva-5 (Kooji et al., 2021) Enfin, plusieurs études montrent que des facteurs tels que la culture ou l'environnement influencent de manière déterminante les performances exécutives (Er-Rafiqi et al., 2017). Des épreuves comportant des étalonnages adaptés à chaque culture sont donc préconisées (Bellaj & Seron, 2013).

Pour ce travail, nous avons choisi d'adopter une approche intégrative en utilisant à la fois des tests cognitifs et des questionnaires afin de s'approcher au mieux du fonctionnement exécutif des participants. Malgré les controverses, nous nous sommes basés sur une structure factorielle tripartite comme celle proposée notamment dans les modèles de Diamond (2013) et Miyake et al. (2000) avec un facteur d'inhibition, de flexibilité cognitive et de mise à jour en MDT. Chaque facteur sera évalué à l'aide de tâches multiples pour mettre en évidence un construit commun.

3.1.3 Les FE dans le développement typique

De nombreux travaux se sont intéressés à l'évolution des FE avec l'âge (pour une revue, voir Fourneret & des Portes, 2017). Les travaux récents confirment l'existence de trajectoires développementales différentes pour l'inhibition, la flexibilité et la mise à jour en MDT au cours de l'enfance et de l'adolescence (c.-à-d que chaque fonction ne mature pas au même âge ni à la même vitesse et peut également varier d'un individu à un autre ; e.g. Theodoraki et al., 2020). Bien que l'apparition précoce des FE ait été mise en évidence, leur développement se poursuivrait jusqu'au début de l'âge adulte (e.g. Tervo-Clemmens et al., 2023; Younger et al., 2023) en raison de la maturation neurobiologique tardive des régions frontales, et plus spécifiquement du cortex préfrontal (e.g. Dennis, 2006; Roy, 2015). Comme expliqué précédemment, tandis que la mise à jour en MDT et l'inhibition émergeraient dès les premiers

mois de vie, la flexibilité s'individualiserait plus tardivement, durant la période préscolaire (Diamond, 2013; Lee et al., 2013).

3.1.3.1 L'inhibition

Selon Houdé (2007), le développement de l'enfant repose à la fois sur la construction et l'utilisation de stratégies cognitives tel que le proposait Piaget (1966), mais également sur l'apprentissage de l'inhibition de stratégies en compétition au niveau cérébral via l'expérience (stratégie essai-erreur), l'imitation ou l'instruction. Plusieurs formes d'inhibition ont été individualisées (pour une revue, voir Chevalier, 2010), notamment la résistance à l'interférence (maintien des informations pertinentes bloquées en MDT), l'inhibition de réponses prépondérantes (suppression des réponses automatiques) et l'inhibition conceptuelle (suppression des informations non pertinentes à la tâche en cours). La taxonomie plutôt consensuelle introduite par Nigg (2000) postule l'existence de deux formes d'inhibition volontaire : l'inhibition exécutive qui correspond au contrôle et à la suppression intentionnelle de réponses qui peut être individualisée en plusieurs sous-types dont l'inhibition comportementale (mesurée par exemple par des tâches de Go no-Go), le contrôle de l'interférence (mesurée par exemple par des tâches de Stroop), et l'inhibition cognitive (mesurée par des tâches d'amorçage) ; et l'inhibition motivationnelle qui correspond à l'activation du système émotionnel interférant avec le comportement en cours (mesurée par des tâches incluant une composante émotionnelle). Des prémices des capacités d'inhibition sont observées chez des nourrissons dès les premiers mois de vie, favorisant ainsi les premières orientations attentionnelles sur une variété de tâches complexes d'inhibition de la réponse (tâches de conflit), telles que la tâche de Stroop Jour/Nuit (adaptation de la tâche de Stroop classique avec des images – dire « jour » lorsqu'une lune est présentée et dire « nuit » lorsqu'un soleil est présenté) ou le jeu de la main de Luria (l'enfant doit faire un poing avec sa main lorsqu'on lui montre un doigt et inversement) (Garon et al., 2008). À partir de 12 mois, les nourrissons font preuve d'inhibition motrice, ils sont ainsi capables de trouver un objet à un emplacement, puis d'inhiber cette information pour pouvoir le trouver à un autre emplacement (pour une méta-analyse, voir Marcovitch & Zelazo, 1999). Entre 1 et 3 ans, l'enfant développe la capacité à différer une récompense immédiate pour une meilleure récompense plus tardive (Carlson, 2005). Vers l'âge de 3 à 4 ans, une forme plus complexe d'inhibition impliquant une composante de MDT commencerait à se développer (Garon et al., 2008). En effet, les enfants d'âge préscolaire (3 à 4 ans) obtiennent de meilleurs résultats dans la tâche de Luria que dans

la tâche Jour/Nuit car cette dernière est plus exigeante sur le plan exécutif. Plusieurs auteurs précisent que de nombreuses tâches destinées à évaluer l'inhibition sont en réalité plus complexes et mesurent plusieurs processus (e.g., Garon et al., 2008; Nigg, 2000; Simpson & Riggs, 2005). Par exemple la célèbre tâche de Stroop Jour/Nuit implique à la fois une composante d'inhibition (ne pas produire une réponse non pertinente) mais également de mise à jour en MDT dans la mesure où l'enfant doit maintenir en mémoire la règle tout en inhibant la ou les réponses non pertinentes (e.g., Carlson & Moses, 2001; Gerstadt et al., 1994). Ainsi, les performances dans des tâches de Stroop ou de Go no-Go (tâche dans laquelle un individu doit identifier un stimulus pertinent et inhiber un stimulus non pertinent) montrent de fortes améliorations durant cette période développementale. Malgré des résultats hétérogènes d'un âge à un autre après la période préscolaire (pour une revue, voir Best & Miller, 2010), les progrès se poursuivent globalement jusqu'à l'adolescence (de manière moindre) et se stabilisent autour de l'âge de 17 ans (e.g., Best & Miller, 2010; Chevalier, 2010; Diamond, 2013; Fournieret & des Portes, 2017).

3.1.3.2 La mise à jour en MDT

De manière générale, les études sur le développement de l'enfant considèrent à la fois les composantes de stockage et de mise à jour en MDT comme une FE unique (Best & Miller, 2010; Chevalier, 2010). Cependant, certaines tâches mobilisent uniquement des processus de stockage comme les tâches d'empan envers ou croissant, tandis que d'autres mobilisent des processus de mise à jour (impliquent le maintien des informations pertinentes et la suppression des informations non pertinentes) telles que les tâches d'empan complexes ou dynamiques. Le développement de la MDT se fait de manière continue dès les premiers mois de vie (pour une synthèse, voir Gathercole, 1998). Dès l'âge de 6 mois, des nourrissons sont capables de mémoriser l'emplacement d'un objet après un délai de quelques secondes (Reznick et al., 2004). À partir de l'âge de 4 ans et jusqu'au début de l'adolescence, la MDT dans sa composante de mise à jour se développe aussi bien pour les informations visuelles qu'auditives via les tâches d'empan envers ou complexes qui impliquent la manipulation mentale des informations stockées à court terme (e.g., Carlson, 2005; Carriedo et al., 2016; Crone et al., 2006; Garon et al., 2008; Gathercole et al., 2004; Huizinga et al., 2006; Pelegrina et al., 2015). L'âge de maturation, soit de stabilisation des processus de mise à jour en MDT, ne fait pas consensus dans la littérature mais se situerait globalement durant l'adolescence (11 ans - Lechuga et al., 2006 ; 15 ans - Carlson, 2005; Carriedo et al., 2016; Crone et al., 2006 ; Garon et al., 2008;

Gathercole et al., 2004 ; Huizinga et al., 2006; Pelegrina et al., 2015 ; 18-20 ans - Conklin et al., 2007; Luciana et al., 2005). Ces disparités sont également en lien avec le type de tâche utilisée et de la charge exécutive mobilisée.

3.1.3.3 La flexibilité cognitive

La flexibilité cognitive est généralement mesurée à l'aide de paradigmes proposant l'alternance entre plusieurs tâches ou critères. Au niveau développemental, certaines études montrent des signes précoces de flexibilité dès l'âge de 2 ans et demi dans une tâche d'alternance de consignes simples (Brooks et al., 2003). La flexibilité cognitive évoluerait de manière significative durant la période préscolaire. Chez l'enfant de 3-4 ans, on observe sur une tâche comme le Dimensional Change Card Sort (tâche qui consiste à trier des cartes en fonction d'un critère comme la forme ou la couleur ; Zelazo, 2006) des capacités à trier des cartes en fonction d'un seul critère, tandis que l'alternance entre plusieurs critères n'est pas encore possible. Cette capacité est acquise un peu plus tard vers 4-5 ans (Doebel & Zelazo, 2013). Les capacités de flexibilité évoluent ensuite jusqu'à l'adolescence, avec une progression notable autour de 7-9 ans, l'enfant deviendrait capable de réaliser des changements de critères multiples et surtout d'initier par lui-même cette alternance dans des paradigmes de task switching par exemple (lorsque le participant alterne entre plusieurs critères) ou sur des tâches complexes telles que le Wisconsin Card Sorting Test (e.g., Cianchetti et al., 2007; Davidson et al., 2006; Diamond, 2013; Huizinga & van der Molen, 2007). Entre 15 et 17 ans, les adolescents atteindraient alors un niveau de flexibilité comparable à celui des adultes (e.g., Bellaj et al., 2016; Best & Miller, 2010; Crone et al., 2006; Davidson et al., 2006; Huizinga & van der Molen, 2007).

Cette hétérogénéité du développement des FE dans le développement typique aussi bien d'une fonction à une autre que d'un individu à un autre est également retrouvée dans la plupart des pathologies neurodéveloppementales (Roy, 2015). Il est donc possible de supposer qu'il existe également une forte variabilité intra- et inter-individuelle dans le TDIL.

3.1.4 Les FE dans le développement atypique

Les FE seraient affectées dans de multiples contextes cliniques tels que les troubles neurodéveloppementaux, les lésions acquises ou encore certaines pathologies spécifiques (e.g., Canton, 2017; Roche, 2017; Spaniol & Danielsson, 2022). Outre la revue de Fidler et Lanfranchi (2022) qui synthétise les enjeux méthodologiques de l'étude des FE dans le TDI, les revues ciblant spécifiquement le TDIL sont rares. Comme introduit de manière détaillée dans le Chapitre 1, quelques études mettent en évidence les difficultés cognitives dans le TDIL (pour une revue, voir Gourlat et al., 2024; Hronis et al., 2016) et plus particulièrement une altération des FE (e.g., Danielsson et al., 2012; Van der Molen et al., 2007, 2009; Zagaria et al., 2021).

Certaines études ont montré des difficultés spécifiques du contrôle inhibiteur associées au TDIL. On retrouve des performances altérées chez des jeunes enfants porteurs de TDIL, par rapport à celles d'enfants TV âgés de 4 à 7 ans (Grada & Simoni, 2018), de 10 à 14 ans (Gligorović & Buha Đurović, 2014), de 14 à 16 ans (Bexkens, Van der Molen, et al., 2014) et d'adolescents âgés de 15 à 23 ans (Zagaria et al., 2021). Les rares travaux ayant examiné les capacités d'inhibition incluent souvent des individus avec différents degrés de sévérité de DI (pour une méta-analyse, voir Bexkens et al., 2014). On retrouve dans cette méta-analyse à la fois chez les enfants et les adultes, des difficultés d'inhibition moyennes à importantes, dont l'ampleur a été modulée par le type d'inhibition (comportementale et contrôle de l'interférence) mobilisé dans la tâche, mais pas par l'âge ou les comorbidités.

Les auteurs s'accordent donc sur l'existence de difficultés chez les individus porteurs d'un TDI quel que soit l'âge en comparaison avec des individus TV appariés sur l'AC. De manière clinique, les premiers ne mobiliseraient pas leurs ressources inhibitrices de la même manière que les seconds (i.e., inhibition émotionnelle préservée et inhibition comportementale déficiente) (Treillet et al., 2014), et ceci serait corrélé à des troubles du comportement externalisé (e.g., agitation, impulsivité, violences) (Schuiringa et al., 2017). Cependant, il est important de souligner les limites méthodologiques de ces études, notamment l'absence de groupe contrôle (Gligorović & Buha Đurović, 2014; Grada & Simoni, 2018; Schuiringa et al., 2017) et l'inclusion de participants présentant un TDI avec différents degrés de sévérité (TDI modéré, Treillet et al., 2014 ; TDI limite, Bexkens et al., 2014; Schuiringa et al., 2017) qui peuvent moduler l'interprétation de ces résultats.

Concernant la mise à jour en MDT, plusieurs études ont mis en évidence de moins bonnes performances (évaluées par des tâches d'empan dynamiques verbaux et visuospatiaux) chez

les enfants porteurs d'un TDIL par rapport à celles d'enfants TV de même AC (11 à 17 ans selon les études) et de même âge mental (AM) (e.g., Danielsson et al., 2012; Van der Molen et al., 2007; Zagaria et al., 2021). Ces résultats soutiennent l'hypothèse d'un retard de développement d'environ 5 ans des capacités exécutives chez les enfants porteurs d'un TDIL, bien que leurs performances n'aient jamais été comparées à celles d'un groupe d'enfants TV plus jeunes. Une autre étude (Carretti et al., 2010) a utilisé une analyse de fonction discriminante destinée à identifier quelles tâches permettent le mieux discriminer les deux groupes. Les résultats ont montré les performances à une tâche mise à jour en MDT permettent de classer 75 % des individus porteurs de TDIL (AC : $m = 38.4 \text{ ans} \pm 12.3$ et AM : $m = 6.2 \text{ ans} \pm 1.6$) comparativement à des sujets TV (AC : $m = 6.5 \text{ ans} \pm 1.3$ et AM : $m = 6.6 \text{ ans} \pm 1.4$). Néanmoins, l'échantillon de cette étude inclus des individus porteurs de TDI de degré de sévérité différents (léger à sévère).

La flexibilité semble elle aussi altérée chez des individus porteurs d'un TDI âgés de 11 à 18 ans (Erostarbe-Pérez et al., 2022), et plus spécifiquement d'un TDIL chez des enfants âgés de 10 à 14 ans (Gligorović & Buha, 2013). Dans leur étude, Danielsson et al. (2012) montrent que les capacités de flexibilité cognitive sur une tâche de fluence verbale d'enfants porteurs d'un TDIL âgés de 11 à 15 ans sont comparables à celles d'enfants TV appariés sur l'AM ($m = 7,33 \text{ ans} \pm 9 \text{ mois}$) mais inférieures à celles d'enfants de même AC ($m = 12,33 \text{ ans} \pm 12 \text{ mois}$). Une étude récente a montré que dans une tâche de flexibilité nécessitant un changement de règle simple avec une implication minimale des capacités intellectuelles (Truck Loading Task ; développée par Fagot & Gauvain, 1997), les capacités de flexibilité des individus porteurs d'un TDIL ne diffèrent pas de celles d'individus TV appariés sur l'AM (7,9 à 11,6 ans) comme sur l'AC (15,8 à 18,5 ans), malgré une plus grande variabilité associée au TDIL (Kitamura et al., 2022). Ces données suggèrent que les difficultés de flexibilité dans le TDIL seraient uniquement observées sur des tâches complexes. Force est de constater que les travaux sur la flexibilité cognitive dans le TDIL sont trop peu nombreux pour pouvoir conclure clairement, ce qui renforce l'intérêt de l'étudier de manière plus systématique dans nos travaux.

Dans les études sur les FE, les auteurs incluent généralement une mesure de la VTI. En effet, la VTI est une fonction cognitive de bas niveau qui pourrait sous-tendre d'autres fonctions plus complexes (Salthouse, 1996). Certains auteurs postulent notamment qu'elle sous-tendrait la variance partagée entre les FE (e.g., Albinet et al., 2012; Lee et al., 2013). En considérant qu'il s'agit d'une ressource de traitement impliquée dans tous les actes de la vie quotidienne et dans la majorité des fonctions cognitives de plus haut niveau (e.g., Finkel et al., 2005), et que

cette ressource s'accroît au cours du développement, il est essentiel d'examiner son évolution avec l'âge dans le développement typique et atypique.

3.2. La vitesse de traitement de l'information

3.2.1 Définition

« La VTI est la vitesse à laquelle les opérations cognitives fondamentales peuvent être effectuées. Parfois appelée vitesse mentale, VTI ou vitesse cognitive, cette fonction cognitive fait référence à une ressource de traitement dans la mesure où elle intervient dans toutes les activités quotidiennes, et, le temps étant compté, plus le traitement est rapide, meilleures sont les performances cognitives qui en résultent » (traduit d'après Albinet, 2015). Elle correspond ainsi à l'efficacité avec laquelle un individu peut percevoir, interpréter et répondre aux informations reçues (Salthouse, 1996). Tandis que certains auteurs considèrent que la VTI constitue un processus cognitif à part entière et donc indépendant (Span et al., 2004), d'autres suggèrent qu'elle sous-tendrait la variance partagée entre les FE, c'est-à-dire qu'elle représenterait un processus de bas niveau commun à l'ensemble des FE (e.g., Lee et al., 2013; Rose et al., 2012). En effet, les mesures des FE sont fortement corrélées aux mesures de la VTI. Bien que cette relation entre VTI et FE soit relativement controversée dans la littérature, plusieurs travaux attestent d'un lien entre elles (e.g., Kail, 2000; Kail & Salthouse, 1994; Miyake et al., 2000). Dans ses travaux, Salthouse (1994, 2005) postule que les FE seraient un conglomérat de processus cognitifs qui incluraient des capacités de raisonnement ou encore de VTI, ce qui concorde avec les études montrant que la VTI expliquerait les différences d'âge de développement dans les capacités exécutives au cours du vieillissement (e.g., Fisk & Sharp, 2004). À l'inverse, certaines études ont mis en évidence que le déclin exécutif lié à l'âge au cours du vieillissement persiste au-delà du ralentissement de la VTI (e.g. Albinet et al., 2012; Keys & White, 2000). Il est donc difficile de conclure sur la part d'implication de la VTI dans les FE. Néanmoins, les auteurs s'accordent sur la difficulté à isoler la VTI des FE dans une tâche. Chez l'adulte, l'étude d'Albinet et al. (2012) portant sur le lien entre FE et VTI au cours du vieillissement normal montre qu'un ralentissement du traitement de l'information expliquerait en grande partie (plus de 85 %) les déficits liés à l'âge dans les 3 composantes exécutives déjà évoquées, bien qu'un déficit résiduel lié à l'âge dans chacune d'elles persiste.

3.2.2 L'évaluation de la VTI

La VTI est mobilisée dans de nombreuses activités du quotidien telles que lire, conduire ou prendre une décision. Lorsque l'on mesure la VTI, un enjeu important d'un point de vue méthodologique est de ne pas mesurer d'autres composantes cognitives, comme des aspects perceptifs, moteurs ou décisionnels (Albinet, 2015). Les tâches préférentiellement utilisées sont des tâches simples impliquant la discrimination de stimuli neutres (sans traitement sémantique ou dimension stratégique) et qui ne nécessitent pas l'expérience ou les connaissances de l'individu. Elle est donc généralement évaluée en psychologie via la mesure d'un temps de réaction, et plus précisément des tâches de temps de réaction à deux choix dans lesquelles le participant doit sélectionner le plus rapidement possible un stimulus cible parmi deux choix (Albinet et al., 2012).

3.2.3 La VTI dans le développement typique

Dans le développement typique, la VTI augmente de manière linéaire de la petite enfance jusqu'au début de l'adolescence elle devient comparable à celles de sujets adultes (Anderson et al., 2001; Hale, 2008; Kail, 1991; Kail et al., 2016; Korkman et al., 2001; Salthouse & Kail, 1983). Williams et al. (2014) ont proposé une série de tâches informatisées évaluant la VTI à des jeunes âgés de 9 à 15 ans. Ils ont montré qu'il existe une augmentation majeure de la VTI entre 9 et 12 ans, une augmentation moins marquée entre 12 et 15 ans, et enfin une stabilisation des performances vers l'âge de 15 ans, âge auquel les performances sont comparables à celles d'adultes (Hale, 2008). Par ailleurs, plusieurs travaux se sont intéressés à l'influence de ce développement sur d'autres fonctions cognitives, et en particulier sur le raisonnement (e.g., Demetriou et al., 2002; Kail et al., 2016) et la MDT (e.g., Kail et al., 2016). Par exemple, dans leur étude longitudinale, Kail et al. (2016) ont mis en évidence que l'augmentation de la VTI entre 6 et 13 ans est associée à une amélioration des capacités de raisonnement. Si des capacités intellectuelles élevée sont associées à une VTI rapide, on devrait observer un ralentissement chez des individus dont les capacités de raisonnement ne sont pas efficaces, et donc dans le TDIL.

3.2.4 La VTI dans le développement atypique

Dans le développement atypique, un ralentissement de la VTI a été observé chez les personnes à faible QI (Loranger et al., 2000) et chez les personnes porteuses d'un TDI (Guopeng et al., 2007; Kail, 1992; Saccuzzo et al., 1979). Les travaux de Biesmans et al (2019) ont mis en évidence dans des contextes psychiatriques multiples dont le TDI, que chez des individus avec un faible QI, les FE étaient davantage prédites par des fonctions primitives comme la VTI, que par l'inhibition, la flexibilité et la mise à jour en MDT.

A l'heure actuelle, aucune étude n'a spécifiquement examiné l'évolution avec l'âge de la VTI chez des individus porteurs d'un TDIL. Au regard des travaux sur le TDI, du lien observé entre VTI et QI, mais également de l'implication de la VTI dans les processus exécutifs (e.g., Lee et al., 2013; Miyake et al., 2000) eux-mêmes altérés dans le TDIL (e.g., Danielsson et al., 2012; Spaniol & Danielsson, 2022), nous pouvons émettre l'hypothèse que le développement de la VTI est également altéré dans le TDIL. C'est pourquoi, dans ce travail de thèse, nous avons choisi de mesurer la VTI avec l'objectif de déterminer si, et dans quelle mesure, elle impacte les capacités d'estimation des durées.

A retenir

- Les FE sont des processus de contrôle de haut niveau nécessaires à l'adaptation du comportement de l'Homme à son environnement dans les situations non automatisées.
- Le modèle intégratif et développemental de Diamond est un modèle de référence dans la littérature qui postule l'existence d'une structure des FE à 3 facteurs (inhibition, flexibilité cognitive et la mise à jour en MDT) à partir desquels d'autres FE plus complexes peuvent se décliner. Ce modèle et plus généralement la structure factorielle des FE sont néanmoins remis en cause par de récents travaux.
- Dans le développement typique, chaque FE présente une courbe de développement indépendante avec une maturation complète à la fin de l'adolescence ou au début de l'âge adulte selon les études. Cette courbe développementale pourrait être retardée dans le TDIL, les études montrant généralement des performances moindres par rapport à des individus TV appariés sur l'AC mais comparables à celles d'individus TV appariés sur l'AM.
- La VTI est une composante souvent étudiée en parallèle des FE, car elle constituerait une composante de bas niveau nécessaire à la mobilisation des ressources exécutives.
- Les études développementales montrent que la VTI augmente avec l'âge dans le développement typique jusqu'à la fin de l'adolescence. En revanche, aucune étude n'a étudié la courbe développementale de cette capacité dans le TDIL.

Conclusion

Ce troisième chapitre a permis une description des FE et de la VTI, dans le développement typique et atypique. Les travaux empiriques font état de difficultés dans les composantes d'inhibition, de flexibilité, de mise à jour en MDT dans le TDIL. Concernant la VTI, des travaux suggèrent qu'un QI plus faible serait associé à un ralentissement de la VTI dans le TDI. Aucune étude à l'heure actuelle ne décrit le développement des FE et de la VTI dans le TDIL. Le rôle des FE et de la VTI dans l'estimation des durées a été mis en évidence dans plusieurs études. Le chapitre qui suit s'attachera donc à préciser le lien entre l'estimation des durées et ces fonctions cognitives.

Chapitre 4 : Le rôle des FE et de la VTI dans l'estimation des durées

Le lien entre FE, VTI et estimation temporelle a été fortement investigué ces dernières années (e.g., Baudouin et al., 2006; Brown, 2006; Droit-Volet, 2013; Droit-Volet & Hallez, 2019; Droit-Volet & Zélanti, 2013; Hallez, 2020; Hallez & Droit-Volet, 2017; Ogden et al., 2011, 2014, 2019; Rattat & Chevalier, 2020), montrant notamment le rôle important joué par les composantes d'inhibition, d'attention, de mise à jour en MDT ou encore de VTI (e.g., Brown & Perreault, 2017; Droit-Volet & Zélanti, 2013; Zélanti & Droit-Volet, 2011). Plus précisément, l'estimation de durées nécessiterait des ressources exécutives différentes selon la tâche temporelle utilisée et son niveau de difficulté (e.g., Ogden et al., 2011, 2014, 2019). Tandis que la reproduction de durées solliciterait davantage les capacités de flexibilité cognitive et de mise à jour en MDT, la tâche de bissection solliciterait quant à elle principalement des capacités d'inhibition (Ogden et al., 2019). Bien que l'implication de l'inhibition dans une tâche de reproduction temporelle n'ait pas été montrée par l'équipe de Ogden en 2014, plus récemment, Rattat et Chevalier (2020) ont mis en évidence que le contrôle inhibiteur est nécessaire pour traiter avec précision le temps dans une tâche de reproduction de durées, et que l'augmentation des capacités d'estimation des durées avec l'âge pourrait alors être due (du moins en partie) à l'amélioration des capacités exécutives, et plus spécifiquement du contrôle inhibiteur, avec l'âge. De plus, les effets de l'inhibition sur l'estimation des durées seraient plus accentués dans les tâches complexes (mobilisant parfois d'autres processus cognitifs) (Brown et al., 2013). Enfin, concernant la VTI, les travaux de Droit-Volet et ses collaborateurs ont révélé qu'elle était l'un des meilleurs prédicteurs de la variabilité et de la précision dans une tâche de reproduction de durées (Droit-Volet et al., 2015) et mais également dans une tâche de bissection (Droit-Volet & Zélanti, 2013) chez des enfants âgés de 5 à 8 ans et des adultes.

L'inhibition jouant un rôle crucial dans la régulation des ressources attentionnelles (Block et al., 2010), nous pouvons supposer que les individus présentant des déficits d'inhibition auront des difficultés pour filtrer les stimuli non pertinents, ce qui entraînerait une augmentation de la charge cognitive et une diminution des ressources attentionnelles disponibles pour la tâche d'estimation des durées (e.g., Block et al., 2010; Droit-Volet & Zélanti, 2013). Dans le cadre du modèle d'horloge interne précédemment exposé (Chapitre 2, p. 58), l'attention contrôlant l'interrupteur, la baisse des ressources attentionnelles pourrait perturber le fonctionnement de celui-ci (Block & Zakay, 1997), créant des difficultés à percevoir et à traiter avec précision les

durées. Par ailleurs, les difficultés d'inhibition peuvent également altérer les processus de mise à jour en MDT qui sont impliqués dans le stockage et la manipulation des informations temporelles (e.g., Ogden et al., 2011). Dans la tâche de reproduction par exemple, le participant doit surveiller et maintenir différentes durées en mémoire (la durée cible et la durée reproduite). Des capacités d'inhibition efficaces sont donc nécessaires à la fois pour sélectionner les informations pertinentes et ne pas tenir compte des interférences dans l'accumulation des impulsions (fonctionnement de l'interrupteur au niveau de l'horloge), mais également pour mettre à jour ces informations (fonctionnement de la MDT au niveau mnésique). Ainsi, des difficultés d'inhibition peuvent entraver ces processus, entraînant des distorsions dans l'estimation des durées et la récupération en mémoire (Barkley et al., 2001).

Comme pour l'inhibition, le rôle des capacités de mise à jour en MDT dans l'estimation des durées pourrait se situer aussi bien au niveau de l'horloge interne qu'au niveau mnésique. Au niveau de l'horloge interne, l'accumulation d'impulsions correspondant à la durée à reproduire implique des ressources de mise à jour en MDT car elle repose sur la sélection et la mise à jour des informations nécessaires à ce comptage (e.g., Brown et al., 2013; Droit-Volet & Zélanti, 2013; Ogden et al., 2011; Zélanti & Droit-Volet, 2011, 2012). Au niveau mnésique, les ressources de mise à jour sont également mobilisées pour sélectionner et maintenir en MDT la durée de référence, (Miyake et al., 2000; Morris & Jones, 1990).

La flexibilité cognitive serait également une capacité exécutive nécessaire pour estimer précisément des durées. En effet, pour reproduire une durée, l'individu doit alterner entre le maintien de la durée en cours d'estimation et la représentation en mémoire de la durée cible, (Ogden et al., 2014). Il doit en effet alterner entre ces deux durées pour les maintenir toutes deux en mémoire (niveau mnésique) et comparer ces deux durées en mémoire pour initier et terminer la reproduction de la durée au bon moment (niveau décisionnel). Des études ont effectivement mis en évidence que des performances élevées en flexibilité cognitive sont associées à une grande précision dans une tâche de reproduction temporelle (e.g., Brown et al., 2013; Wearden et al., 2010).

Enfin, concernant la VTI, elle jouerait un rôle dans l'accumulation des impulsions et la comparaison des représentations temporelles en mémoire. En effet, nous savons que les impulsions sont stockées en MDT jusqu'à ce que le nombre accumulé soit proche d'un nombre critère d'impulsions correspondant à la durée de référence (Gibbon et al., 1984). Le contenu accumulé est alors transféré en MDT pour être comparé au contenu stocké correspondant à la durée de référence. Ainsi, une VTI plus lente pourrait conduire à des sous-estimations si le nombre d'impulsions accumulées est plus faible, et à des surestimations s'il est plus élevé. Ceci

est cohérent avec la théorie de Salthouse qui postule l'existence de deux mécanismes dans la VTI qui influenceraient la cognition. La simultanée selon laquelle un traitement plus lent de l'information réduit la quantité d'informations accessible, et le délai selon lequel les opérations cognitives réalisées trop lentement ne pourraient pas être achevées dans le temps imparti (Salthouse, 1996). Ainsi, si la VTI est trop lente, l'information est traitée plus lentement, et l'individu a accès à moins d'informations, ce qui pourrait être à l'origine de distorsions cognitives.

En conclusion, il ressort que les FE et la VTI sont impliquées dans la capacité à estimer des durées, bien que ces liens soient dépendants de la tâche utilisée. Aucune étude n'a à ce jour examiné ces liens chez des individus porteurs de TDIL.

A retenir

- Le lien entre l'estimation des durées, les FE et la VTI a été mis en évidence dans plusieurs travaux, malgré une hétérogénéité des résultats selon les tâches utilisées. La tâche de reproduction temporelle mobiliserait l'ensemble de ces fonctions, tandis que la tâche de bissection mobiliserait davantage des processus d'inhibition et de VTI.
- L'inhibition serait nécessaire pour allouer les ressources attentionnelles au stimulus temporel, et pourrait impacter à l'interrupteur (niveau de l'horloge interne) et la MDT (niveau mnésique)
- La mise à jour en MDT pourrait également être impliquée aussi bien dans le maintien des informations nécessaire pour accumuler les impulsions dans le pacemaker (niveau de l'horloge interne) mais également dans le maintien en MDT des informations sur la durée de référence pour la transférer en mémoire à long terme (niveau mnésique).
- La flexibilité cognitive serait impliquée dans l'alternance entre la durée à reproduire en MDT et la durée de référence (niveau mnésique) mais également pour comparer ces deux durées (niveau décisionnel).
- La VTI aurait un impact sur le processus même d'accumulation des impulsions lors du traitement de l'information temporelle.

Conclusion

Ce dernier chapitre a permis de préciser les liens entre les FE, la VTI et l'estimation des durées. Estimer les durées est une activité cognitive complexe qui serait sous-tendue par d'autres processus cognitifs qui varieraient selon la tâche temporelle utilisée. Or, comme mentionné précédemment, les individus porteurs d'un TDIL présentent à la fois des déficits d'estimation des durées, des déficits exécutifs et une VTI ralentie qu'il convient de mieux caractériser. Au regard de la littérature, il est possible de se demander si le retard observé chez les enfants porteurs d'un TDIL dans leurs capacités d'estimation des durées est dû à un trouble du traitement de l'information temporelle ou bien à un trouble des fonctions cognitives qui sous-tendent l'estimation des durées, telles que les FE ou encore la VTI. La prochaine section cherchera à répondre à cette question en présentant la problématique, les objectifs et les hypothèses de ce travail de thèse.

Problématique, objectifs et hypothèses

Comme introduit dans le cadre théorique de ce travail de thèse, le TDIL est un trouble neurodéveloppemental caractérisé par un tableau cognitif comprenant notamment des difficultés d'estimation des durées (Rattat & Collié, 2020) et de plusieurs fonctions cognitives, en particulier les FE et la VTI (e.g., Danielsson et al., 2012; Spaniol & Danielsson, 2022; Van der Molen et al., 2007; Zagaria et al., 2021). Parmi les ressources cognitives impliquées dans l'estimation des durées, ces fonctions cognitives ont été reconnues comme particulièrement importantes (e.g., Baudouin et al., 2006; Brown, 2006; Droit-Volet & Hallez, 2019; Droit-Volet & Zélanti, 2013; Ogden et al., 2011, 2014, 2019; Rattat, 2010; Rattat & Chevalier, 2020; Zélanti & Droit-Volet, 2011). Partant de ce constat se pose alors la question de leur rôle dans les difficultés d'estimation des durées chez des enfants et adolescents porteurs d'un TDIL idiopathique. Nous postulons que ces difficultés temporelles pourraient être expliqués par la défaillance des FE et de la VTI qui sont impliquées dans l'estimation des durées. Pour rappel, nous examinerons l'implication spécifique de 3 processus exécutifs fondamentaux (l'inhibition, la mise à jour en MDT et la flexibilité) en nous basant sur le modèle tripartite défendu entre autres par Miyake et al. (2000) et Diamond (2013).

Plusieurs travaux empiriques ont mis en évidence une amélioration des capacités exécutives via un entraînement chez des individus porteurs d'un TDIL (e.g., Orsolini et al., 2015, 2019), beaucoup d'entre eux ayant ciblé spécifiquement la MDT (pour une méta-analyse, voir Danielsson et al., 2015). Ces travaux montrent des améliorations de la MDT à court terme, et des résultats très hétérogènes concernant le transfert et le maintien de ces gains dans le temps (Bussy, 2016). Il est toutefois important de souligner que ces travaux présentent plusieurs limitations méthodologiques, notamment le manque d'outils spécifiques au TDIL (Nouwens, 2018; Nouwens et al., 2017, 2020) et la difficulté à constituer des échantillons homogènes avec des profils cognitifs similaires (Bussy, 2016). Les travaux présentés dans la revue sur le TDIL dans le Chapitre 1 permettent de lister un certain nombre de recommandations nécessaires à la mise en œuvre d'un entraînement cognitif adapté à cette population. À partir de ces éléments, nous postulons que la mise en œuvre d'un entraînement cognitif qui tient compte de ces recommandations, aussi bien sur le plan méthodologique que sur le contenu, pourrait permettre l'amélioration des fonctions cognitives (FE et VTI) et du même coup celles d'estimation des durées chez des individus porteurs d'un TDIL.

L'objectif de ce travail de thèse est donc quadruple : (1) examiner les capacités d'estimation des durées, les FE et la VTI chez des enfants et adolescents porteurs d'un TDIL comparativement à des pairs TV au développement typique (Étude 1), (2) évaluer la courbe développementale entre 10 et 20 ans de ces habiletés cognitives dans cette population spécifique toujours en comparaison avec des pairs TV (Étude 1), (3) identifier si leurs difficultés à estimer des durées sont dues à un trouble du traitement de l'information temporelle ou à des difficultés exécutives ou de VTI (Étude 1), et (4) évaluer la faisabilité et l'efficacité d'un entraînement cognitif dans cette population spécifique (Étude 2).

Afin de répondre à ces 4 objectifs, 2 études ont été conduites. La première étude (Étude 1) cherche à caractériser les performances d'estimation des durées, des FE et de VTI d'enfants et adolescents porteurs de TDIL idiopathique âgés de 10 à 20 ans recrutés dans différents instituts médico-éducatifs (IME) de France. Ces données ont été analysées au travers de deux articles scientifiques, le premier s'intéressant aux liens entre estimation des durées et mise à jour en MDT (Article 2), et le second aux liens entre d'une part l'estimation des durées et d'autre part l'inhibition, la flexibilité et la VTI (Article 3). Elles ont ensuite été complétées par des analyses supplémentaires prenant en compte l'ensemble des résultats de ces deux articles. Les données de cette première étude fournissent des éléments de réponse aux 3 premiers objectifs présentés ci-dessus. La seconde étude (Étude 2) a quant à elle pour but d'évaluer les conditions de faisabilité et d'efficacité d'un entraînement cognitif chez 5 adolescents porteurs d'un TDIL âgés de 11 à 14 ans en comparaison avec 5 autres adolescents porteurs d'un TDIL âgés de 11 à 14 ans n'ayant pas bénéficié de cet entraînement (Article 4). Les données recueillies proposent des pistes de réponses au 4^{ème} et dernier objectif du présent travail de thèse.

Sur la base de la littérature existante, plusieurs hypothèses ont pu être formulées. Concernant l'Étude 1, nous nous attendons à observer des performances inférieures à la fois dans les tâches d'estimation des durées, exécutives et de VTI chez les individus porteurs d'un TDIL idiopathique comparativement aux individus TV de même AC. De plus, nous postulons l'existence d'une courbe de développement de ces capacités similaire mais décalée dans le temps chez les individus atteints de TDIL idiopathique par rapport aux individus TV appariés sur l'AC. Enfin, nous émettons l'hypothèse de l'existence de relations significatives entre les performances aux tâches temporelles, exécutives et de VTI. Nous nous attendons plus spécifiquement à ce que les difficultés d'estimation des durées observées chez les individus porteurs d'un TDIL idiopathique ne persistent plus après avoir contrôlé leurs performances

exécutives et de VTI. Concernant l'Étude 2, nous supposons qu'un protocole spécifiquement conçu pour prendre en compte les caractéristiques du TDIL et mobilisant l'ensemble du fonctionnement cognitif, avec un accent tout particulier sur les FE et la VTI, pourrait permettre l'amélioration des capacités exécutives, de VTI et par extension d'estimation des durées des individus porteurs d'un TDIL. Dans la prochaine section seront présentés les différents protocoles de recherche utilisés dans nos deux études ainsi que les résultats obtenus.

Partie expérimentale

1. Étude 1

L'objectif de cette première étude était de caractériser les capacités d'estimation des durées, exécutives et de VTI, ainsi que le lien entre elles, chez des participants porteurs d'un TDIL en comparaison avec des participants TV. Cette étude a fait l'objet de deux articles scientifiques. Le premier article (Article 2) porte sur le rôle de la mise à jour en MDT dans l'estimation des durées chez les individus porteurs d'un TDIL comparativement à des individus TV. Il a été publié dans la revue *Quarterly Journal of Experimental Psychology* en Avril 2023. Le second article (Article 3) examine le rôle de l'inhibition, de la flexibilité cognitive et de la VTI dans l'estimation des durées chez les individus porteurs de TDIL comparativement à des individus TV. Cet article a été soumis dans la revue *Journal of Intellectual Disability* en Septembre 2024. Une section supplémentaire propose une synthèse des résultats de ces deux articles ainsi que des analyses complémentaires afin de préciser et d'apporter des éléments de compréhension aux résultats globaux de cette première étude.

1.1. Article 2: Deficits of duration estimation in individuals aged 10-20 years old with idiopathic mild intellectual disability: The role of updating working memory

Résumé en français de l'article

La capacité à estimer des durées joue un rôle central dans l'adaptation du comportement humain à son environnement (Zakay, 2012). Des difficultés dans le développement des capacités d'estimation des durées a récemment été mis en évidence chez des enfants et adolescents porteurs d'un TDIL âgés de 10 à 19 ans, comparativement à un groupe d'enfants et adolescents au développement typique (Rattat & Collié, 2020). Sachant que les capacités de mise à jour en MDT sont impliquées dans l'estimation des durées (e.g., Brown, 2006 ; Ogden et al., 2014), et que celles-ci sont moindres chez les individus porteurs d'un TDIL (Rattat & Collié, 2020), l'objectif de notre étude était de voir si les difficultés d'estimation des durées de ces individus provenaient d'un trouble du traitement de l'information temporelle ou bien de leurs moins bonnes capacités de mise à jour en MDT.

Les performances d'estimation des durées et de mise à jour en MDT de participants porteurs d'un TDIL idiopathique sans troubles associés âgés de 10 à 20 ans (N = 79) ont été comparées à celles de participants typiques (N = 81). L'estimation des durées a été évaluée via une tâche de bissection temporelle (Annexe 1.1) et une tâche de reproduction temporelle (Annexe 1.2) issues des travaux de Droit-Volet et al. (2015). Les performances de mise à jour en MDT ont été évaluées à l'aide d'une tâche d'empan dynamique spatial (Annexe 1.3), une tâche d'empan dynamique verbal (Annexe 1.4) et une tâche de 2-back (Annexe 1.5). Les données recueillies ont été converties en z-scores, et un score composite moyen a été calculé et utilisé comme mesure pour les capacités de mise à jour en MDT.

Les résultats mettent en évidence des difficultés dans la capacité à estimer des durées courtes (< 1 s) chez les enfants et adolescents porteurs d'un TDIL idiopathique, tant dans une tâche de bissection que dans une tâche de reproduction temporelle. D'autre part, des difficultés de mise à jour en MDT ont également été mis en évidence dans cette population. Enfin, les données ont permis d'identifier que les difficultés d'estimation des durées chez les individus porteurs d'un TDIL étaient partiellement expliquées par leurs moins bonnes capacités de mise à jour en MDT. Ces données suggèrent donc que les capacités de mise à jour en MDT expliqueraient partiellement le retard dans le développement des capacités d'estimation des durées observé chez les individus porteurs d'un TDIL.

Cet article empirique a été publié dans la revue *Quarterly Journal of Experimental Psychology* en 2023 et a fait l'objet de 2 communications, une communication orale au congrès international de l'ESCOP en 2024 à Porto (Portugal), et une communication affichée au congrès de la SNLF à Paris en 2023.

Deficits of duration estimation in individuals aged 10–20 years old with idiopathic mild intellectual disability: The role of updating working memory

Quarterly Journal of Experimental Psychology
1–15
© Experimental Psychology Society 2023
Article reuse guidelines:
sagepub.com/journals-permissions
DOI: 10.1177/17470218231185309
qjep.sagepub.com


Elsa Gourlat , Anne-Claire Rattat , Benoît Valéry
and Cédric Albinet

Abstract

Duration estimation is a conceptual ability that plays a crucial role in human behaviour. Impairments in duration estimation ability have a significant impact on daily autonomy and social and cognitive capacities, even more so in psychological disorders. It has been recently shown that the ability to estimate durations develops at a slower pace in individuals with mild intellectual disability (MID) compared with typically developing (TD) individuals. More generally, it has been also demonstrated that duration estimation requires working memory updating. In this study, we compared the duration estimation and updating performances of individuals aged 10–20 years with idiopathic MID without associated disorders to those of typical individuals of the same ages ($N=160$). Our results highlight a developmental lag not only in the capacity to estimate short durations (<1 s) in individuals with idiopathic MID, both in a bisection task and in a reproduction task, but also in working memory updating capacity. The findings also emphasise—for the first time—the importance of updating for both the age-related increase in duration estimation capacities and the deficits of these capacities in idiopathic MID. This is consistent with the hypothesis that duration estimation deficits in idiopathic MID may be due, to a large extent, to lower updating abilities.

Keywords

Duration estimation; updating; mild intellectual disability

Received: 7 November 2022; revised: 26 April 2023; accepted: 27 April 2023

Abbreviations

ID: intellectual disability

MID: mild intellectual disability

TD: typically developing

ADHD: attention deficit hyperactivity disorder

ASD: autism spectrum disorder

CER: research ethics committee

BP: bisection point

WR: Weber ratio

DV: dependent variable

Introduction

Duration estimation is a conceptual ability that plays a crucial role in human behavior (Zakay, 2012). It allows individuals to reproduce the duration of actions in daily life, predict the end of these actions or compare them to each other depending on their length. This ability gradually develops from the sensory, motor and relational experiences to which individuals are exposed during their life. Impairments in duration estimation ability have a significant impact on daily autonomy and social and cognitive capacities, even more so in psychological disorders. Intellectual disability (ID) is a neurodevelopmental disorder that implies deficits in various fields, including cognitive ones (APA, 2013; INSERM, 2016). A recent study specifically showed that the ability to estimate durations develops at a slower pace in individuals with mild ID (MID) compared to typically developing (TD) individuals (Rattat & Collié, 2020b). Better clinical and educative interventions are needed for these individuals to further understand the processes underlying their temporal difficulties. Fundamentally, a link has been highlighted between executive functions and duration estimation processes (e.g., Ogden et al., 2011, 2014, 2019). More precisely, it has been demonstrated that duration estimation particularly requires working memory updating resources (referred to here as updating), which reflects an individual's ability to monitor incoming information and update the contents of working memory accordingly (Baddeley, 1986; Miyake et al., 2000b; Morris & Jones, 1990). Although the development of updating and duration estimation processes has been studied in TD individuals from childhood to adulthood (for reviews, see Carriedo et al., 2016; and Droit-Volet, 2016, respectively), these developmental aspects have not yet been deeply studied in individuals with MID, with few studies on updating (Carretti et al., 2010) and only one study on duration estimation (Rattat & Collié, 2020). Moreover, no study has yet analyzed the link between these two core cognitive functions in this specific population.

The main objective of the present study was, therefore, to report empirical evidence of the differential developmental curves of duration estimation capacities and updating abilities in a large sample of individuals with MID compared to TD ones. The central hypothesis we aimed to test is that the difficulties in duration estimation shown in individuals with MID are related to their deficits in updating.

1. Duration Estimation and Updating

According to classic internal clock models (e.g., Gibbon et al., 1984; for a review, see also Wearden, 2003), estimation duration depends on the number of pulses generated continuously by a pacemaker and transferred into an accumulator through a switch, which can be opened or closed, knowing that the transition of pulses can only be done when it is closed. Being able to accurately monitor the accumulation of pulses from the pacemaker thus presumably requires updating resources (e.g., Baudouin et al., 2006; Brown, 2006; Ogden et al., 2011, 2014). This idea was confirmed by Ogden and colleagues' studies highlighting significant correlations between duration estimation and updating performance in adults. Let us take the example of the two temporal tasks used in the present study. In a duration reproduction task, individuals must reproduce the reference duration of a previously presented stimulus as accurately as possible, trying to wait for the exact reference duration between their two key presses. In a temporal bisection task, individuals have to categorize a current stimulus duration as more similar to a long or short reference duration previously presented several times. Both a reproduction task monitoring the time elapsed since the first key press and initiating the second key press when appropriate, or a bisection task monitoring the duration of the current stimulus in order to compare it with reference durations, clearly involve working memory updating (Ogden et al., 2011).

Indeed, as briefly introduced above, updating requires monitoring and coding incoming relevant information into working memory and then revising old, no longer pertinent information by replacing it with newer adequate information (Miyake et al., 2000b; Morris & Jones, 1990). This process involves *temporal tagging* and goes beyond the simple passive storage of information as it involves the central executive function of working memory (Baddeley, 1986; Morris & Jones, 1990). As such, it is considered a fundamental executive function (Friedman & Miyake, 2017; Miyake et al., 2000b; Snyder et al., 2015). Several neuropsychological and experimental tasks have been developed to evaluate how updating differs from passive short-term storage. The most used tasks involve dynamically monitoring and updating verbal or spatial information, such as in the N-back task (Braver et al., 1997), where the subject is presented with a sequence of stimuli and must decide whether each one is similar to the one presented N trials ago. Another example is the running span task (Morris & Jones, 1990), where the subject has to recall serially the most recent items from lists with various and unpredictable lengths.

2. Typical Development of Duration Estimation and Updating

Duration estimation has been extensively studied in typical development over the past twenty years (e.g., Droit-Volet et al., 2001; Hallez & Droit-Volet, 2017; McCormack et al., 1999; Rattat & Droit-Volet, 2005; for a recent review, see also Hallez, 2022). It appears from these works, mainly using a bisection task, that unlike temporal accuracy (i.e., the ability to accurately estimate durations), which generally remains stable with age, the sensitivity to durations (i.e., the variability in duration estimation) increases with age until 8 or 9 years old when it reaches a level similar to that of adults (for a review, see Droit-Volet, 2016). More recently, Li et al. (2022) even showed the following dissociable developmental pattern of sensitivity to durations in a bisection task: temporal sensitivity increased with age between 7 and 11 years, while it remained stable between 12 and 17 years. For a reproduction task, the response pattern between children and adults is slightly different since duration reproductions become less variable and more accurate with increasing age from childhood to adulthood (e.g., Block et al., 1999; Droit-Volet, 2010; Szelag et al., 2002). More precisely, Droit-Volet (2010) showed that 5-year-old children reproduced longer durations for short stimuli (< 1 sec) than 8-year-olds and young adults did because their motor response took longer to complete, and conversely, shorter durations for long stimuli lasting for several seconds. Moreover, regardless of duration range, the variability of the reproduced durations decreased significantly between each age group. Thus, even at the age of 8 years, the children remained more variable in their temporal reproductions than adults.

There are conflicting findings in the literature concerning the developmental curve of the updating capacity in typical children. Several studies (Carriedo et al., 2016; Crone et al., 2006; Gathercole et al., 2004; Huizinga et al., 2006; Pelegrina et al., 2015) showed that performance in various updating tasks (e.g., N-back task, running span task) increases linearly, at least until mid-adolescence (around 15 years old), followed by stabilization. In contrast, the study of Lechuga and collaborators (2006) demonstrated a maturation of updating processes only until the age of 11. Other studies suggested that updating develops until 16 or 17 years old and then remains stable around 18 to 20 (Conklin et al., 2007; Luciana et al., 2005).

Despite studies examining the development of duration estimation or updating capacities separately, no study has yet focused on their link. This being said, some studies have nonetheless investigated the link between working memory and duration estimation capacity (e.g., Droit-Volet et al., 2015; Hallez & Droit-Volet, 2017, 2019; Rattat, 2010). In particular, Droit-Volet et al. (2015) showed that age-related differences in duration estimation were greater

in the reproduction task than in the bisection task because the former involves more working memory ability (measured by using a backward version of the Corsi Block-Tapping test).

Duration estimation and updating are thus cognitive functions, each with its own developmental curve in typical development. More precisely, duration estimation develops from early childhood until becoming stable at around 11 years old. Updating will mature longer, until adolescence (Carriedo et al., 2016) or even adulthood (Luciana et al., 2005), depending on studies. What about the developmental curves of these two fundamental processes and their link in MID? We may question the implication of updating processes in duration estimation abilities, especially when these cognitive skills have not fully matured.

3. Development of Duration Estimation and Updating in MID

As defined in the DSM-5 (APA, 2013b), ID is a neurodevelopmental disorder that implies deficits in intellectual and adaptive functioning (i.e., in conceptual, social, and practical fields), assessed through standardized clinical assessments. In addition, the onset of these deficits must occur during childhood. Within ID, MID, which is the most frequent ID category, refers to an intelligence quotient (IQ) falling between 50 and 70 (± 5), and is found in about 1-2% of the population in France. Among them, about 80% of cases are called idiopathic, i.e., their cause is unknown (INSERM, 2016). Moreover, MID has characteristics including a limited understanding of risk in social situations combined with immature social judgment (i.e., social field), an occupation requiring few cognitive skills (i.e., practical field), as well as a poor problem-solving compared to chronologically age-matched peers (i.e., conceptual field) (APA, 2013b). Despite its relatively high prevalence, the scientific literature about MID is sparse. Studies have often combined different levels of disability (mild to severe) with related comorbidities (e.g., attention deficit hyperactivity disorder-ADHD, autism spectrum disorder-ASD), which often made it difficult to interpret the origin of the deficits.

Very few studies have examined the impact of ID, and even less of MID, on duration estimation. Among these studies, those of Janeslätt and colleagues (2008, 2009, 2010, 2019) aimed at creating a time measurement tool, the KaTiD-Child, for children with ID. The instrument was composed of 57 items measuring time processing (time perception, time orientation and time management). Their results supported the hypothesis of a developmental lag in children with ID compared to typically developing ones. This lag would occur between 2 and 5 years, as ID children aged 10 years old had performances similar to typically developing

(TD) children aged 5-8 (Janeslätt et al., 2010). However, as explained above, the major limitation of these studies was the panel of participants who presented different severity levels of ID (mild to severe) and related disorders such as ADHD or ASD, leaving the actual origin of timing difficulties unresolved. More recently and related to the present study, Rattat and Collié (2020) have examined the developmental curve, from 5 to 19 years old, of duration estimation abilities in both idiopathic MID individuals without related disorders and TD individuals matched on chronological age, in a bisection task using short durations (i.e., 200-800 ms). Compared to TD participants, children with MID clearly exhibited a lower duration sensitivity (i.e., higher variability), while they did not underestimate or overestimate durations (i.e., no time distortion). More precisely, participants with MID aged 11-13 years and TD children aged 5-7 years did not exhibit different duration sensitivity levels, nor did participants with MID aged 16-19 years and TD children aged 8-9 years. This pattern of results suggested that individuals with MID seem to follow the same developmental curve of duration estimation capacity as TD individuals but with an age delay of approximately half their age; this delay does not decrease from 11 to 19 years. Of importance, there is currently no study on the effect of MID on the capacity to estimate durations in a reproduction task. This lack will be assessed in the present work.

Other researchers have examined the impact of MID on working memory performance (Danielsson et al., 2012b; Van der Molen et al., 2007b; Zagaria et al., 2021b). Overall, the results of these studies have highlighted a deficit of working memory performance (assessed through verbal and spatial span tasks) in children with MID compared to TD children of the same age (aged from 11 to 17 years old depending on studies). On the contrary, no deficit of working memory performance was observed when comparing children with MID to a younger group of TD children (aged from 8 to 14 years old depending on studies). This implies that children with MID have working memory performances similar to younger TD children (paired on mental age) but poorer than those of TD children of the same age (paired on chronological age). These results support the hypothesis of a developmental lag in working memory capacities in children with MID. A significant omission in these studies is the examination of the development of working memory capacities. Indeed, they included only one age group, thus preventing the analysis of the evolution of these abilities with age throughout childhood and adolescence.

Moreover, there is a paucity of studies examining updating in this pathology. The existing literature shows that ID and TD individuals differ in working memory tasks that require attentional and executive control, suggesting the role of updating in their difficulties

(Lanfranchi et al., 2004). Moreover, the study by Carreti and collaborators (2010) identified updating performance as a significant predictor of the presence of ID in 75% of cases. However, the limitation of this study is the inclusion of different levels of severity of ID (mild to severe) in the sample of participants. More studies are required to understand better the functioning of updating in ID, and more specifically in idiopathic MID, as well as its development from childhood to adulthood.

Finally, to the best of our knowledge, no study has systematically examined the developmental trajectory of both duration estimation capacities and updating capacity and whether or not updating capacity is related to duration estimation difficulties in individuals with MID. The present study aimed to address these questions.

The Present Study

The present study used a developmental approach to evaluate both duration estimation and updating capacities in a relatively large sample of individuals aged from 10 to 20 years old who presented typical development or idiopathic MID. First, duration estimation capacities were evaluated using two different and well-known experimental tasks, namely a temporal bisection task and a temporal reproduction task, thus tapping into different components of duration estimation. Second, updating was evaluated using three different tasks to overcome the problem of task impurity and to examine individual performance at the level of the cognitive construct. Indeed, as argued by Rabitt (1997) and Miyake et al. (2000), directly measuring an executive function, such as updating, is problematic because, by definition, it operates on other cognitive processes. Each task implies not only the executive process of updating but also other cognitive processes (e.g., language or visuospatial processing). Accordingly, to address these limitations in the present study and to obtain a more robust and reliable measure of performance, a composite score was computed from three experimental tasks that tap into updating, reflecting the process more selectively. Finally, and significantly, all the tasks used in the present study could be performed by all age groups to examine the developmental trajectory of duration estimation and updating capacities - not only in TD individuals but also in individuals with idiopathic MID. This thus allowed us to examine the relation between these cognitive abilities as a function of both age and MID.

Based on the reviewed literature, we first expected to observe a deficit in both duration estimation and updating abilities in individuals with idiopathic MID. Second, we postulated a delayed developmental curve of these capacities in individuals with idiopathic MID compared to TD individuals matched on chronological age. Finally, we hypothesized that there would be

significant relationships between updating and duration estimation performance. The duration estimation deficit observed in idiopathic MID individuals would no longer persist after controlling for their updating deficit.

Method

Participants

Based on the effect sizes reported by a previous study comparing duration estimation capacities between TD children and children with idiopathic MID (η^2_p between .11 and .31; see Rattat & Collié, 2020), an a priori power analysis returned a sample size estimation of 25 participants per group to achieve 80% power with an α -level set at 5%. Accordingly, 27 participants per group were recruited to account for the potential experimental loss. In the end, the final panel comprised 160 participants: 81 TD participants and 79 participants with idiopathic MID without associated disorders. The main characteristics of the final sample are presented in Table 1.

Table 1

Characteristics of the participants' groups.

GROUP		AGE		
		10-12 years old	13-16 years old	17-20 years old
TD				
N		27	27	27
% boys (n)		51.85% (14)	67.00% (18)	18.52% (5)
mean		11.22	13.56	18.63
age		0.64	0.89	1.11
sd				
MID				
N		25	27	27
% boy (n)		76.00 % (19)	59.26 % (16)	55.56 % (15)
Mean		10.76	14.56	18.11
age		0.93	1.15	0.85
sd				

TD : typically developing and MID : mild intellectual disability

All participants were recruited from five primary and secondary schools and universities and ten medico-social establishments in the southwest of France (i.e., Occitanie). Participants with idiopathic MID were directly diagnosed by their institutions. We systematically ensured that none of them had other diagnosed disorder(s) (i.e., dyslexia, dysorthographia, ADHD, ASD) or other neurological or genetic pathology, and that the TD participants' ages were appropriate for their grade level. The exclusion criteria comprised all sensory disorders of vision, perception or motor skills that could limit the performance of the experimental tasks.

Participants and parents (for minors), as well as schools and medico-social establishments' directors, provided informed consent before entering the study and the protocol followed the ethical standards laid down in the Declaration of Helsinki and was approved by the Research Ethics Committee (CER) of the University of Toulouse (IRB No. 2020-317).

Material and Tasks

The reported protocol was part of a larger study examining the duration estimation capacities and executive functions in TD and MID individuals. The present study included only five tasks: two duration estimation tasks (i.e., a temporal reproduction and a temporal bisection task) performed in session 1, and three updating tasks (i.e., a verbal running span task, a spatial running span task and a 2-back task) performed in session 2. The order of the tasks within a session and the order of sessions were counterbalanced across participants. All five tasks were adapted from existing tasks not only in the clinical characteristics of MID but also in the age of participants. This ensured that all the participants performed precisely the same tasks. A laptop computer controlled the presentation of the stimuli and directly recorded the participants' responses through an original program based on the Python programming language (version 3.9), more specifically, the PsychoPy library (version 2021.1.0; Peirce et al., 2019). Participants responded by pressing keys on two millisecond-accurate response boxes: a Cedrus RB-740 response box dedicated to session 1 and a (4x4) 16-key box that was specifically homemade for session 2 (see below).

Evaluation of Duration Estimation

Duration Reproduction Task. In this task, the participants had to reproduce as accurately as possible the reference duration of a stimulus they were initially presented with (see Fraisse, 1948). In our study, we have adapted the version of the task used by Droit-Volet et al. (2015). Each trial began with the presentation of a fixation cross during 150 ms, followed by the duration to estimate (i.e., a blue circle) in the center of the computer screen. Then, the participants had to press the OK key twice: a first press to start the reproduced duration (making the blue circle appear again on the computer screen) and a second press when they estimated that a duration similar to the reference one had elapsed (making the blue circle disappear). Each participant received two demonstration trials and four training trials, all with a duration of 350 ms; and then performed 42 test trials, six for each of the seven selected durations (i.e., 400, 470, 530, 600, 670, 730, 800 ms) presented in random order. The dependent variables (DVs) for this task were the accuracy score, corresponding to the mean difference between temporal

reproduction and stimulus duration divided by stimulus duration, and the variability score (standard deviation/mean of accuracy score). Respectively, the accuracy score indicated the extent to which the stimulus duration was accurately estimated ($= 0$), overestimated (> 0), or underestimated (< 0); and the variability score reflected the variance in durations reproduced, a low score indicating a low variability, which reflects better performance.

Temporal Bisection Task. Also inspired by the study of Droit-Volet et al. (2015), based on the work of Wearden (1991), this task consisted of two successive phases: training and testing. In the training phase, the participants were initially presented with two reference durations, a long one (800 ms) and a short one (400 ms), five times successively. They were then presented with a series of eight trials – four trials for each reference duration – presented in random order, and trained to indicate on each trial whether the stimulus duration was short or long by pressing the corresponding key on the response box. The training phase was repeated until only correct answers were obtained. After each response, feedback appeared on the screen (i.e., happy face or sad face). In the testing phase, the participant was required to judge whether the comparison stimulus duration was more similar to the short or the long reference duration by pressing the corresponding key. No performance feedback was given. The participant performed 56 test trials divided into eight blocks of seven trials, one for each of the seven selected comparison durations, which were the same as those used in the reproduction task (i.e., 400, 470, 530, 600, 670, 730, 800ms). The trials were presented in random order. The inter-trial interval was randomly chosen between 500 and 1000 ms. The DVs for this task were the bisection point (BP), an index of the accuracy of duration estimation, and the Weber ratio (WR), an index of the sensitivity to durations (smaller WR indicates higher sensitivity to durations, and conversely higher WR indicates lower sensitivity to durations). These two indexes were calculated by applying the regression method to the individual bisection function, presenting the mean proportion of *long* responses (i.e., identification of a stimulus as being more similar to the long reference duration than to the short one) plotted against the comparison stimulus durations (for the method, see Church & Deluty, 1977; Wearden, 1991).

Evaluation of Updating

Verbal Running Span Task. Based on the paradigm first developed by Pollack et al. (1959), this task was adapted from Albinet et al. (2012). Lists of six, eight, 10 or 12 consonants were said aloud by the experimenter at the rate of one letter every two seconds. Participants were not informed about the length of each list and were asked to keep it in memory and then

recall in order the last three letters of each series (strict forward serial recall). Participants gave their responses orally. The experimenter noted these in a dedicated grid. The length of the sequences was randomly presented. After two demonstration lists and four training lists (one of each length), participants were presented with eight trial lists (two for each length). The DV for this task was the percentage of letters correctly recalled in the proper order.

Spatial Running Span Task. Also adapted from Albinet et al. (2012), in this task, participants were faced with a homemade response box consisting of a 4×4 illuminating buttons matrix. These illuminating response buttons lighted up one after the other for one second, creating sequences of various lengths (six, eight, 10 or 12). Participants were not informed about the length of each sequence. They were asked to keep it in memory and then recall the last three spatial locations of each sequence serially, by pressing the corresponding buttons (strict forward serial recall). No spatial location was repeated in the same sequence, and elements that were too easily identifiable (e.g., crosses) had been discarded. The length of the sequences was randomly presented. After two demonstration sequences and four training sequences (one of each length), participants were presented with eight trial sequences (two for each length). The DV for this task was the percentage of spatial locations correctly recalled in the proper order.

2-Back Task. Based on the paradigm first developed by Kirchner (1958), this 2-back task version was adapted from Chevalier (2018). In this version, participants were confronted with a series of 60 items (6×10 different items) presented in a pseudo-random order. Participants had to identify whether the current item was identical to (target) or different (distractor) from the one presented two trials before (2-back). The task consisted of four phases: a denomination one (one block of ten items), a demonstration one (one block of two trials), a training one (one block of ten trials with three targets and seven distractors) and a test one (three blocks of 30 trials with ten targets and 20 distractors). In the naming phase, the participants had to name aloud the ten items (e.g., *bus*, *chat* [cat], *clé* [key], *os* [bone]) presented to ensure that they knew each item. The associated word for each item was always composed of only one syllable (e.g., *os* (bone)) so as not to bias the updating assessment. Thus, the phonological span in working memory was always the same. If the participant made a mistake or used a word with more than one syllable, the examiner rephrased it aloud (e.g., *baguette* instead of *pain* (bread)). The experimenter performed the demonstration phase. Participants responded by pressing the yes (green) key if the item was the same or the no (red) key if the item was different. The

right/left location of these keys was counterbalanced across participants. The DV for this task was the percentage of correct responses given.

Computation of a Composite Score Reflecting Updating. Raw scores from each updating task were transformed into z-scores (using means and standard deviations for the whole group). A Cronbach α was computed for these z-scores to assess how well the three tasks measured a single underlying construct. The Cronbach α was high (0.894), indicating that each variable measured the one-dimensional latent construct of working memory updating. Thus, we computed a composite score (updating score), which was the individual mean of the three z-scores of the cognitive tasks.

Procedure

The participants were tested individually in a closed and quiet room during two different sessions spaced by no less than 30 minutes, which was considered a sufficient rest period. They were seated on a chair, facing the computer screen and response box. Before starting, the experimenter explained the tests' organization and ensured that the instructions were well understood. Prior to testing, each participant's anonymity data was filled in on the testing computer. Epidemic-related barrier measures were followed during and between all runs. Equipment was disinfected between each participant. Masks were worn. Finally, the test could be stopped if the participant showed signs of discomfort or uneasiness, but this did not happen. Overall, sessions 1 and 2 lasted between 30 and 45 minutes each, including pauses.

Statistical Analyses

The data will be analyzed in three ways. First, we will examine the main effects and interaction effects of Group (MID vs. TD) and Age (10-12; 13-16; 17-20 years old) on duration estimation scores. Second, we will examine these same effects on the updating score. This will be done by running analyses of variance (ANOVAs) or analyses of covariance (ANCOVAs), taking into account the variable Sex (1 = male; 2 = female) when it will show a significant effect on the DV in preliminary analyses (at the end, this was only the case for the reproduction task and the updating score). More precisely, for the temporal reproduction task, the accuracy score and the variability score will be analyzed with 2 (Group: MID vs. TD) \times 3 (Age: 10-12; 13-16; 17-20 years old) \times 7 (Duration: 400, 470, 530, 600, 670, 730, 800 ms) ANCOVAs with repeated measures on the last factor and with Sex as a covariate. For the temporal bisection task, ANOVAs using the same statistical plan without the covariate will be performed on BP

and WR. When Mauchly's test of sphericity indicates that the assumption of sphericity is violated for the repeated measures Duration, the degrees of freedom will be adjusted using the Greenhouse-Geisser correction. For the updating score, we will run a 2 (Group: MID vs. TD) \times 3 (Age: 10-12; 13-16; 17-20 years old) ANCOVA with Sex as a covariate. Third, we will examine the relationship between duration estimation scores and updating scores. This will be done by performing partial bivariate correlations (controlling for Sex). Finally, we will rerun the analyses performed in steps one and two, adding the updating score as a covariate, to examine if the results will remain statistically significant after controlling for the updating score. Post-hoc analyses will be performed using Bonferonni corrections for multiple comparisons. The level of significance is set at $p \leq .05$. Partial estimated effect sizes (η^2_p) will be reported for significant results

Results

Duration Estimation

Temporal Reproduction Task

Accuracy Score. An examination of Figure 1, which shows the accuracy score as a function of Age and Group, clearly suggests that MID participants reproduced longer durations than TD ones. This was confirmed by the statistical analysis since the main effect of Group was significant, $F(1, 153) = 10.97, p = .001, \eta^2_p = .07$. The Group \times Duration interaction effect reached statistical significance, $F(4.329, 662.329) = 11.01, p < .0001, \eta^2_p = .07$. Post-hoc t -tests for independent samples indicated that MID participants reproduced durations longer than those of the TD participants for the shortest durations (i.e., mean reproduced duration for 400, 470 and 530 ms; $t(158) = 3.42, p = .001$), but not for the longest ones (i.e., mean reproduced duration for 670, 730 and 800 ms; $t < 1$). In sum, the accuracy score was lower in MID participants than in TD participants because they reproduced greater overestimations of the shortest durations. Although the ANCOVA revealed a significant main effect of Age, $F(1, 153) = 3.26, p = .04, \eta^2_p = .04$, none of the 2-to-2 Age \times Group comparisons was significant (10-12 vs. 13-16 years old: $p = .12$; 10-12 vs. 17-20 years old: $p = .06$; 13-16 vs. 17-20 years old: $p = 1.0$). There was also a significant Age \times Duration interaction effect, $F(8.658, 662.329) = 2.65, p = .006, \eta^2_p = .03$; but again, no comparative statistical analysis to account for this interaction effect was

significant. No other significant effect was observed (Duration: $F < 1$; Duration \times Age \times Group: $F < 1$).

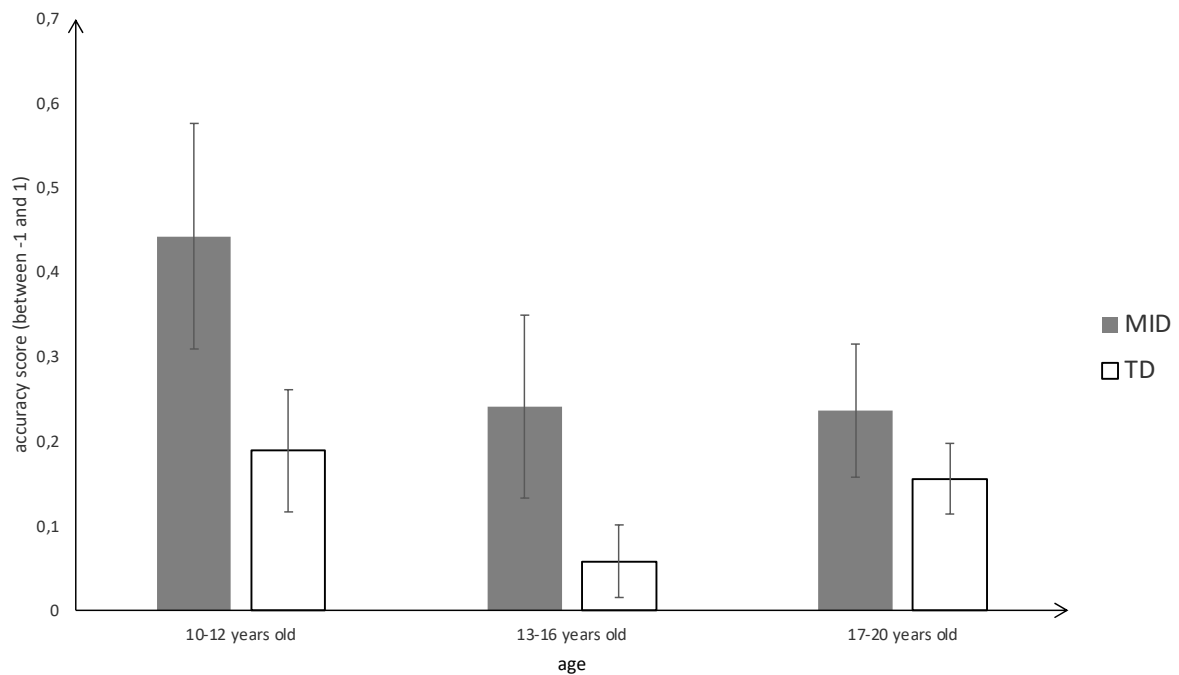


Figure 1

Mean Accuracy score as a function of Group and Age (bars represent standard errors)

Variability Score. As expected, the ANCOVA revealed significant main effects of both Age, $F(2, 153) = 7.18, p = .001, \eta^2_p = .09$, and Group, $F(1, 153) = 51.56, p < .0001, \eta^2_p = .25$. The variability score was greater for children aged 10-12 and 13-16 years old than for the 17-20 years old ($p = .004$ and $p = .003$, respectively); there was no significant difference between the two younger age groups ($p = 1.0$) (Figure 2). Moreover, MID participants were more variable in their temporal reproductions than TD participants (.50 vs. .30). The only significant interaction effect was between Group and Duration, $F(5.411, 827.856) = 2.67, p = .014, \eta^2_p = .02$. The TD participants' temporal variability was greater for the three shortest durations than for the three longest ones (.34 vs. .28, t -tests for paired samples: $t(80) = 4.06, p < .0001$), which it was not the case for the MID participants (.50 vs. .47, $t(78) = 1.59, p = .12$). There were no other significant effects (Duration: $F(5.411, 827.856) = 1.36, p = .23$; Duration \times Age : $F < 1$; Group \times Age : $F < 1$; Duration \times Age \times Group: $F < 1$).

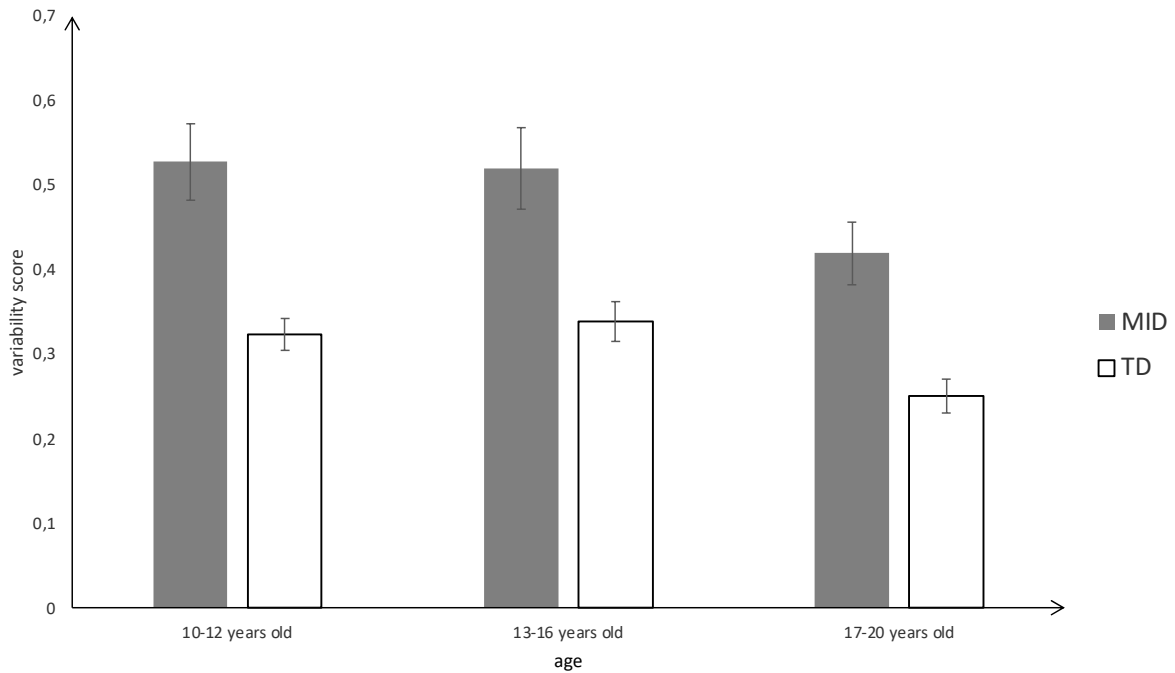


Figure 2

Mean Variability score as a function of Group and Age (bars represent standard errors)

Temporal Bisection Task

As previously explained, for the bisection task, performances are classically examined by calculating two indexes for each participant, namely the BP and the WR, using the regression method. However, in the present study, the individual regression analyses revealed non-statistically significant results for 64.5% of participants with MID (19 aged 10-12 years old, 17 aged 13-16 years old, and 15 aged 17-20 years old) and 24.7% of TD participants (12 aged 10-12 years old, 6 aged 13-16 years old, and 2 aged 17-20 years old). Therefore, it was impossible to calculate either the BP or the WR for these participants. Consequently, contrary to what was planned, we ran the analyses on the proportion of *long* responses with Duration (400, 470, 530, 600, 670, 730, 800 ms) as a within-subjects factor (e.g., Rattat & Droit-Volet, 2005; Wearden, 2008). Indeed, when the regression analysis was not statistically significant, the calculation of the two temporal indexes led to outlier results; for example, the value of the BP was well beyond the range of duration used. It was therefore unfortunately impossible and irrelevant to use for the bisection task indexes similar to those used for the reproduction task.

Proportion of Long Responses. The ANOVA revealed a main effect of Duration, $F(4.678, 720.359) = 204.08, p < .0001, \eta^2_p = .57$, suggesting that the proportion of *long* responses increased with the stimulus comparison duration. However, the significant Duration \times Age interaction effect, $F(9.355, 720.359) = 2.42, p = .009, \eta^2_p = .03$, indicated that the bisection curve became steeper with age, as illustrated in Figure 3. There was also a significant interaction effect between Duration and Group, $F(4.678, 720.359) = 32.29, p < .0001, \eta^2_p = .17$. Post-hoc *t*-tests for independent samples showed that MID participants gave more *long* responses than TD did for the three shortest durations (i.e., mean proportion of *long* responses given for 400, 470 and 530 ms; $t(158) = 7.88, p < .0001$), while the reverse was observed for the three longest durations (i.e., mean proportion of *long* responses given for 670, 730 and 800 ms; $t(158) = -4.50, p < .0001$); which made their bisection curves flatter. No other significant effect was observed (Age: $F < 1$; Group: $F(1, 154) = 3.272, p = .07$; Age \times Group: $F(2, 154) = 2.19, p = .12$; Duration \times Age \times Group: $F(9.355, 720.359) = 1.04, p = .41$).

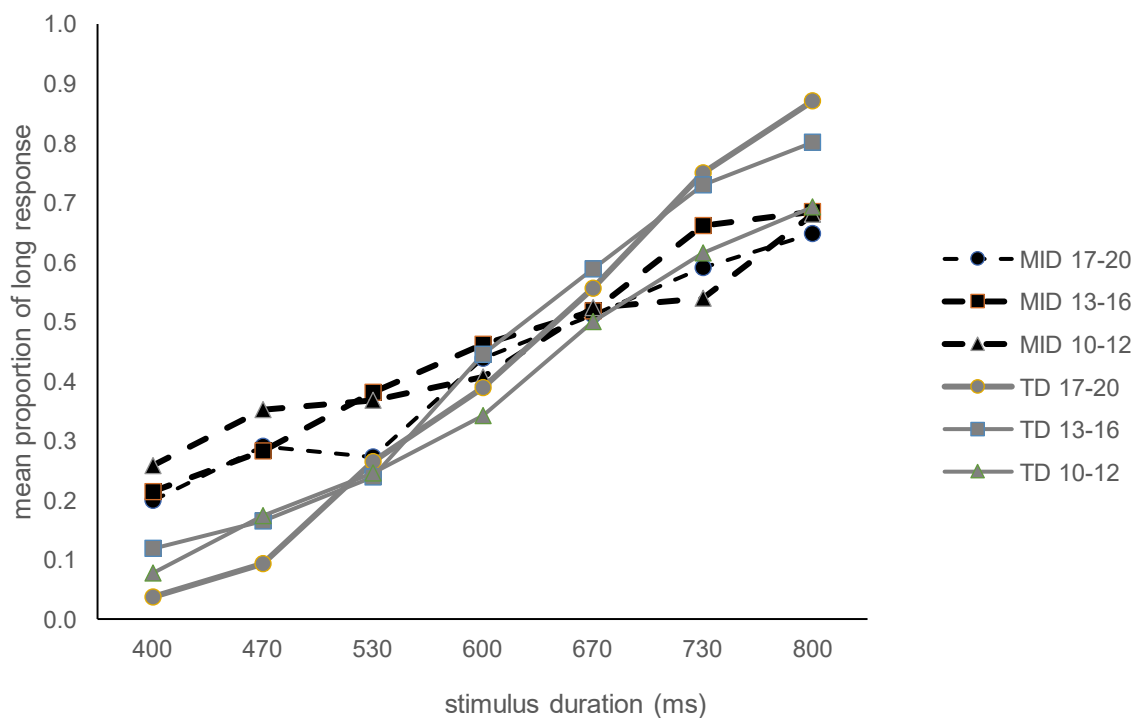


Figure 3

Bisection curves as a function of Group, Age and Duration

Updating

Raw data of the three updating tasks as a function of Age and Group are presented in the Appendix (Table A1 for the verbal running span task; Table A2 for the spatial running span task; Table A3 for the 2-back task).

Figure 4 presents the updating score as a function of Group and Age. The ANCOVA revealed a significant main effect of Group, $F(1,153) = 374.7$, $p < .001$, $\eta^2_p = .71$, showing that TD (0.73 ± 0.38) had a higher updating score than MID (-0.76 ± 0.65). The ANCOVA also revealed a significant main effect of Age, $F(2,153) = 18.3$, $p < .001$, $\eta^2_p = .19$. Post-hoc analyses showed that the 17-20 years group had a significantly higher updating score compared to both the 13-16 years group ($p < .001$) and the 10-12 years group ($p < .001$). These two latter groups did not significantly differ from each other ($p > .5$). Finally, the interaction between Group and Age was not significant ($F > 1$).

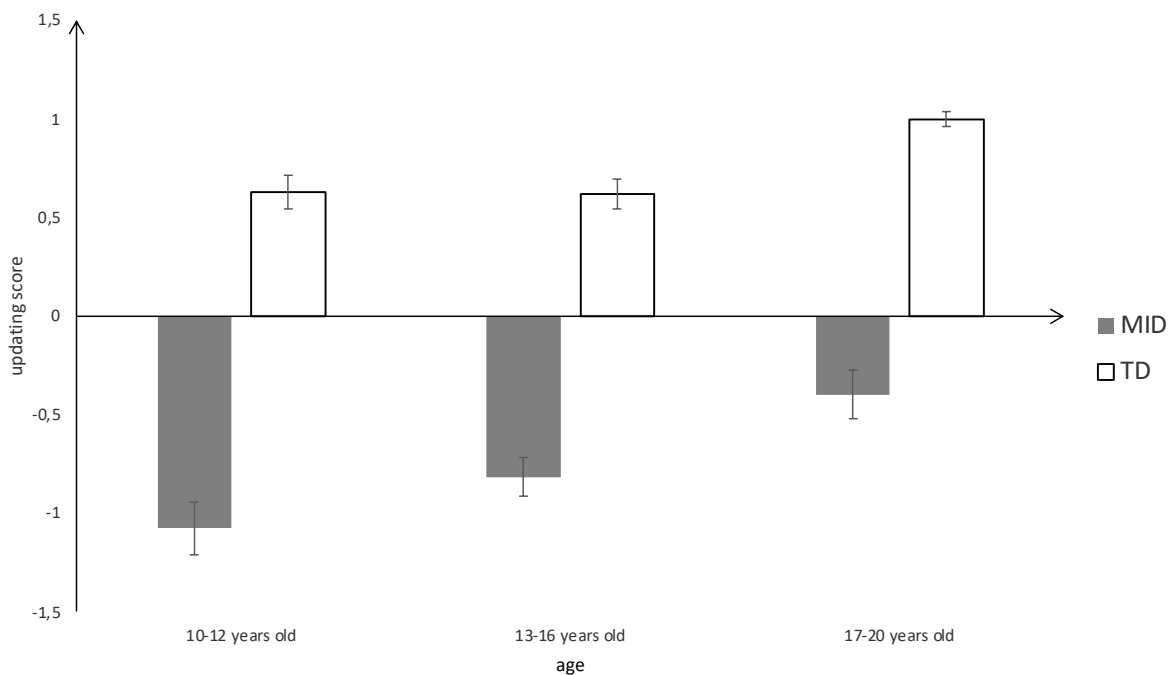


Figure 4

Mean z-score of Updating as a function of Group and Age (bars represent standard errors)

Relationship Between Duration Estimation and Updating Performance

We first examined partial correlations between updating performance and the two performance indexes of the reproduction task. Second, we performed repeated measures ANCOVAs on both accuracy and variability scores in the reproduction task, and on the percentage of *long* responses in the bisection task (due to the impossibility of calculating valid individual indexes of bisection performance), with the updating score as a covariate.

Results of the partial correlations showed that the updating score significantly correlated with the accuracy score ($r = -.50$; $p < .001$) and the variability score ($r = -.52$; $p < .001$). These results indicate that participants with better updating performance exhibited higher duration reproduction performance in terms of both accuracy and variability.

Results of the repeated measures ANCOVA on the accuracy score in the reproduction task showed that none of the previously reported significant main effects and interactions involving the Group and Age factors remained now significant after having controlled for the updating score (all $ps > .2$; all $\eta^2_p < .02$). These results suggest that updating of working memory capacity explained all the duration reproduction accuracy deficits related to age or MID.

Results of the repeated measures ANCOVA on the variability score in the reproduction task showed that the main effects of Age, $F(2, 152) = 3.52$, $p = .032$, $\eta^2_p = .04$, and Group, $F(1, 152) = 5.19$, $p = .024$, $\eta^2_p = .03$, remained significant, although with reduced effect sizes. The analysis also revealed that the Group \times Duration interaction remained significant and relatively unchanged, $F(5.41, 822.8) = 2.78$, $p = .014$, $\eta^2_p = .02$. These results indicate that taking into account updating of working memory capacity explained only part of the deficits related to age and MID in duration reproduction variability, and that these deficits persisted.

Results of the repeated measures ANCOVA on the percentage of *long* responses in the bisection task showed that the Age \times Duration interaction no longer remained significant, $F(9.528, 728.918) = 1.30$, $p = .23$. The analysis also revealed that the Group \times Duration interaction remained significant, but with a reduced effect size, $F(4.764, 728.918) = 3.87$, $p = .002$, $\eta^2_p = .03$. These results indicate that taking into account updating of working memory capacity explained part of the deficits related to MID in bisection performance.

Discussion

Summary of the results

The present study examined the development of duration estimation and updating of working memory abilities in individuals with idiopathic MID from childhood to adulthood, compared to TD ones. In both reproduction and bisection tasks, time sensitivity was systematically lower in participants with MID compared to TD ones. However, time sensitivity increased with age in both groups (i.e., temporal variability decreased). Our findings also showed that duration reproduction was less accurate in participants with MID. Indeed, they overestimated the shortest durations compared to TD participants. Then, we also found an improvement in updating performance with age as well as a deficit in MID participants compared to TD ones. Moreover, we showed that participants with better updating performance exhibited better duration reproduction performance in terms of both accuracy and variability. Finally, in the reproduction task, after controlling for the updating score, the lower time accuracy did not persist in participants with MID. However, their time sensitivity continued to be lower, to a lesser extent. In the bisection task, after controlling for their updating score, the time sensitivity of MID participants also continued to be lower, and to a lesser extent. To better understand these results, we will first focus on the development in MID of time sensitivity and accuracy, and their link to updating. Then we will address updating and time processing more generally, and finally, conclude.

Time sensitivity, updating and MID

First, there is a lag with age of the development of time sensitivity in the bisection task in participants with MID compared to TD ones. This confirms and extends the previous findings of Rattat and Collié (2020). In their study, these authors used a bisection task with auditory stimuli (i.e., 500 Hz tones) whose durations comprised between 200 and 800 ms. In the present study, we used visual stimuli (i.e., blue circle) with a smaller duration range, i.e., 400 to 800 ms, which would have made the discrimination task more difficult. Thus, our results show a difference in time sensitivity in the bisection task between individuals with and without MID. This was observed in all subjects from 10 to 20 years old regardless of the stimulus modality and the ms-duration range.

We can also state that this difference is not specific to the bisection task since we also observed it in the reproduction task. This last finding is a unique contribution of our study. To our knowledge, this is the first study examining temporal reproduction abilities from a developmental perspective in MID. More precisely, we first observed that duration reproduction variability was greater in MID participants than in TD ones. Moreover, it was also greater in young children aged 10 to 16 years than in their elders aged 17-20 years. This last result means that time sensitivity in the reproduction task remains stable from 10 to 16 years old before increasing around 17-20 years.

In sum, the lower time sensitivity in MID during the period from late childhood to early adulthood persists regardless of task (reproduction and bisection), stimulus modality (visual and auditory) and ms-duration range (200-800 ms and 400-800 ms). However, the absence of any significant Group \times Age interaction in our study favors the interpretation of a developmental lag in the improvement with age of time sensitivity in MID. This result was already observed in the previous study conducted by Rattat and Collié (2020). Nevertheless, we cannot definitively rule out the possibility of a developmental deficit. To decide between these two possibilities, older MID adults should be included in the research protocol. Future work should thus incorporate more age cohorts. Indeed, this would allow to ascertain whether the difference reported in the present study progressively decreases until reaching a TD adult-like level or maintains throughout adulthood. The first would confirm the developmental lag, and the second would reflect a developmental deficit instead. Nevertheless, can the developmental lag or deficit in time sensitivity in MID be explained -at least partially- by individuals' working memory updating capacities?

The results of the present study suggest that participants with MID exhibited lower updating capacities than TD individuals, regardless of age, resulting in a similar developmental curve but with a lower baseline. More precisely, in accordance with the existing literature revealing that maturation of updating would continue until mid-adolescence or even adulthood (Carriedo et al., 2016; Luciana et al., 2005), our results highlighted that this maturation continues until at least 17-20 years. As for time sensitivity, the absence of interaction between Age and Group for the updating score in our study is an argument for a developmental lag. This result is consistent with previous studies revealing poorer performance in ID participants compared to TD ones in working memory tasks, particularly involving executive control (Caretta et al., 2010; Lanfranchi et al., 2004).

Furthermore, the present findings also suggest that the systematic lower time sensitivity observed in MID, regardless of age, primarily originates in an updating deficit. Indeed, taking

into account their updating level significantly reduced their time sensitivity deficit (as revealed by the decrease in effect sizes) but did not completely eliminate it as we had initially hypothesized. How can we explain why this deficit in time sensitivity persists in MID? One possible explanation is that this deficit indicates a purely temporal problem, that is, the processing of temporal information. However, there is currently no strong argument in the literature to support the idea that these individuals might have particular difficulty processing temporal information. Moreover, our results showed that all the variance related to MID in duration reproduction accuracy was explained by updating ability. Another possible explanation is related to information processing speed. Previous studies have indeed highlighted a link between processing speed and time estimation. For example, adults with slower information processing speed underperformed in a temporal reproduction task (e.g., Baudouin et al., 2018). Moreover, it has been shown that information processing speed is one of the most reliable predictors of temporal reproduction variability and accuracy in children (Droit-Volet et al., 2015). In the pacemaker-accumulator framework (e.g., Gibbon & Church, 1984), it is assumed that pulses must be stored in an accumulator until the accumulated count is close enough to a criterion number of pulses corresponding to the target duration. The accumulator content may be transferred in working memory, for comparison with stored criterion count corresponding to referent duration(s). Within this framework, we can suppose that information processing speed may affect the accumulation of pulses and/or the comparison processes in memory. Knowing that information processing speed is slower in individuals with ID (Guopeng et al., 2007; Kail, 1992; Loranger et al., 2000; Saccuzzo et al., 1979), we can suggest that it could explain part of their greater variability of duration reproductions in our study. Additional studies, particularly measuring processing speed, are needed to investigate this issue further.

Time accuracy, updating and MID

As reported in the introduction, the ability to accurately estimate durations reaches an adult-like level around age 8-9 in TD individuals (Droit-Volet, 2016). It is not impaired in MID from 11 to 19 years, at least in a bisection task (Rattat & Collié, 2020). We, therefore, expected to observe no effect of either age or MID on time accuracy. However, our data revealed an effect of MID on the capacity to reproduce short durations accurately. More precisely, participants with MID reproduced longer durations for 400-to-530 ms times than TD participants. In other words, even though all participants overestimated the shortest durations,

this overestimation was more pronounced in MID participants. In the bisection task, it should be remembered that time accuracy is traditionally examined through the calculation of the bisection point (i.e., the stimulus duration at which a participant is equally likely to provide a long and short response), which was not possible in our study for a relatively high percentage of participants (64.5% of MID participants and 24.7% of TD participants). Following the previous findings of Rattat and Collié (2020), the bisection curves seemed not shifted to the right or the left compared to those of TD. This would have reflected an under or overestimation of durations, respectively. However, they were flatter in MID, reflecting their lower time sensitivity. Our pattern of results indicates therefore a dissociation, with impaired performance for absolute short durations in MID in the reproduction task, and no temporal distortion in the bisection task. The temporal reproduction task is considered more complex and cognitively demanding than the temporal bisection task; the latter being seen as a more straightforward task of duration categorization (e.g., Droit-Volet et al., 2015; Droit-Volet & Hallez, 2019; Droit-Volet & Rattat, 2007). Consequently, to explain the task-related effect observed in the present study, we can postulate that mean accuracy in the reproduction task required the development of greater cognitive abilities than were required for the bisection task. Considering the implication of working memory resources in the pacemaker-accumulator model, we may suppose that the reproduction task implies more updating abilities than the bisection task.

When controlling updating performance, the effect of MID -as well as the effect of age- on time accuracy in the reproduction task no longer persisted. This result indicates that updating capacities explained all the duration reproduction accuracy deficits related to MID and age in this task. Altogether, these findings are consistent with our main hypotheses that (1) there are significant relationships between updating and duration estimation performance (see the following section) and (2) updating performance explains the effects of MID on time accuracy performance. Unfortunately, the impossibility of calculating the usual bisection performance index (BP) for many participants precluded the possibility of examining these relationships between the accuracy of duration estimation and updating. Further studies examining more systematically the difficulties for computing classical bisection indexes as in our study are needed.

The role of updating in time processing

Within the framework of pacemaker-accumulator models (e.g., Gibbon & Church, 1984), working memory resources would be necessary to enable accurate monitoring of the

accumulation of pulses from the pacemaker and maintaining the duration in progress with that recovered in memory to compare. More particularly, as developed in the Introduction, previous studies have documented that duration estimation requires updating resources, regardless of age in adulthood, (e.g., Baudouin et al., 2006; Brown, 2006; Ogden et al., 2011, 2014), using various tasks to assess time estimation (production, reproduction or estimation tasks) as well as working memory updating (e.g., N-back task, running span task). Findings in this area suggest that timing performance requires updating by showing correlations between duration estimation and updating performance in adults

The results of the present study confirm these results and extend these links between updating and time estimation to typical and MID children aged from 10 to 20 years, at least concerning reproduction capacities. Indeed, our results showed that, overall, updating performance significantly correlated with the accuracy score ($r = -.50$) and the variability score ($r = -.52$) of the reproduction task. Moreover, our results also showed that the general development of time estimation ability was strongly related to the one of updating ability. These findings confirm the involvement of updating resources in time estimation.

One strength of the present study is the confirmation of this strong involvement of updating in duration estimation capacities by using a deeper examination of the updating of working memory, with three different tasks leading to a composite score reflecting better the cognitive construct than using only one single task, as it is usually done in the literature (see Miyake et al., 2000; Rabbit, 1997). Another strength of the present work is the use of two different temporal tasks: a bisection task and a reproduction task. Accordingly, we assessed different components of duration estimation within the same pool of participants. Finally, an originality of this study relies on the developmental approach we used to evaluate both duration estimation and updating capacities in a large sample of individuals aged from 10 to 20 years. On the whole, the present results contribute to a better understanding of the mechanisms underlying time processing and more particularly the role of updating, from a developmental perspective.

Conclusion

In conclusion, by using a large sample of participants aged from 10 to 20 years old, our results highlight a developmental lag in the capacity to estimate short durations in individuals with idiopathic MID, both in a bisection task and in a reproduction task. We also identify a developmental lag in this population in the updating of working memory abilities, by computing a composite score derived from the performance in three different tasks. Our data also

emphasize - for the first time - the importance of updating for both the age-related increase in duration estimation capacities and the deficits of these capacities in idiopathic MID. These results are consistent with the hypothesis that duration estimation deficits in idiopathic MID may be due, to a large extent, to lower updating abilities. They also contribute to the more general scientific literature on the involvement of working memory updating in time processing.

Acknowledgments

This research was part of the Ph.D. thesis of the first author (EG), which was funded by the Occitanie region and the Institut National Universitaire Champollion,- University of Toulouse [grant number 2000 73 20]. The authors thank the association AgaPei, all the clinical staff from the medico-social establishments and all the educational staff of the schools in Occitanie for their active participation in the present study. They also grateful Leila Margouti and Amandine Lapabe for participants' recruitment and data collection. Finally, thank you to each (anonymous) child, adolescent and young adult who completed the study.

Declaration of conflicting interests

The author(s) declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

Funding

The author(s) disclosed receipt of the following financial support for the research, authorship, and/or publication of this article: This research was part of the PhD thesis of the first author (EG), which was funded by the Occitanie region and the Institut National Universitaire Champollion, University of Toulouse (Grant number 2000 73 20).

References

- Albinet, C. T., Boucard, G., Bouquet, C. A., & Audiffren, M. (2012). Processing speed and executive functions in cognitive aging : How to disentangle their mutual relationship? *Brain and Cognition, 79*(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2012.02.001>
- APA. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders : DSM-5TM, 5th ed* (p. xlv, 947). American Psychiatric Publishing, Inc. <https://doi.org/10.1176/appi.books.9780890425596>
- Baddeley, A. (1986). *Working memory* (p. xi, 289). Clarendon Press/Oxford University Press.
- Baudouin, A., Isingrini, M., & Vanneste, S. (2018). Executive functioning and processing speed in age-related differences in time estimation : A comparison of young, old, and very old adults. *Aging, Neuropsychology, and Cognition, 26*, 1-18. <https://doi.org/10.1080/13825585.2018.1426715>
- Baudouin, A., Vanneste, S., Pouthas, V., & Isingrini, M. (2006). Age-related changes in duration reproduction : Involvement of working memory processes. *Brain and cognition, 62*, 17-23. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2006.03.003>
- Block, R. A., Zakay, D., & Hancock, P. A. (1999). Developmental Changes in Human Duration Judgments : A Meta-Analytic Review. *Developmental Review, 19*(1), 183-211. <https://doi.org/10.1006/drev.1998.0475>
- Braver, T. S., Cohen, J. D., Nystrom, L. E., Jonides, J., Smith, E. E., & Noll, D. C. (1997). A parametric study of prefrontal cortex involvement in human working memory. *NeuroImage, 5*(1), 49-62. <https://doi.org/10.1006/nimg.1996.0247>
- Brown, S. W. (2006). Timing and executive function : Bidirectional interference between concurrent temporal production and randomization tasks. *Memory & Cognition, 34*(7), 1464-1471. <https://doi.org/10.3758/BF03195911>
- Carretti, B., Belacchi, C., & Cornoldi, C. (2010). Difficulties in working memory updating in individuals with intellectual disability. *Journal of Intellectual Disability Research, 54*(4), 337-345. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2788.2010.01267.x>
- Carriedo, N., Corral, A., Montoro, P. R., Herrero, L., & Rucián, M. (2016). Development of the updating executive function : From 7-year-olds to young adults. *Developmental Psychology, 52*(4), 666-678. <https://doi.org/10.1037/dev0000091>
- Chevalier, N. (2018). Willing to Think Hard? The Subjective Value of Cognitive Effort in Children. *Child Development, 89*(4), 1283-1295. <https://doi.org/10.1111/cdev.12805>

- Conklin, H. M., Luciana, M., Hooper, C. J., & Yarger, R. S. (2007). Working memory performance in typically developing children and adolescents : Behavioral evidence of protracted frontal lobe development. *Developmental Neuropsychology*, *31*(1), 103-128. https://doi.org/10.1207/s15326942dn3101_6
- Crone, E. A., Wendelken, C., Donohue, S., van Leijenhorst, L., & Bunge, S. A. (2006). Neurocognitive development of the ability to manipulate information in working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *103*(24), 9315-9320. <https://doi.org/10.1073/pnas.0510088103>
- Danielsson, H., Henry, L., Messer, D., & Rönnerberg, J. (2012). Strengths and weaknesses in executive functioning in children with intellectual disability. *Research in Developmental Disabilities*, *33*(2), 600-607. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.11.004>
- Droit-Volet, S. (2010). Stop using time reproduction tasks in a comparative perspective without further analyses of the role of the motor response : The example of children. *European Journal of Cognitive Psychology*, *22*(1), 130-148. <https://doi.org/10.1080/09541440902738900>
- Droit-Volet, S. (2016). Development of time. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *8*, 102-109. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.02.003>
- Droit-Volet, S., Clément, A., & Wearden, J. (2001). Temporal Generalization in 3- to 8-Year-Old Children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *80*(3), 271-288. <https://doi.org/10.1006/jecp.2001.2629>
- Droit-Volet, S., Wearden, J. H., & Zélanti, P. S. (2015). Cognitive abilities required in time judgment depending on the temporal tasks used : A comparison of children and adults. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *68*(11), 2216-2242. <https://doi.org/10.1080/17470218.2015.1012087>
- Friedman, N. P., & Miyake, A. (2017). Unity and diversity of executive functions : Individual differences as a window on cognitive structure. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, *86*, 186-204. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.04.023>
- Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Knight, C., & Stegmann, Z. (2004). Working Memory Skills and Educational Attainment : Evidence from National Curriculum Assessments at 7 and 14 Years of Age. *Applied Cognitive Psychology*, *18*, 1-16. <https://doi.org/10.1002/acp.934>

- Gibbon, J., Church, R. M., & Meck, W. H. (1984). Scalar Timing in Memory. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 423(1 Timing and Ti), 52-77. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1984.tb23417.x>
- Guopeng, C., Yue, J., & Dasen, L. (2007). An experimental research study on working memory and processing speed of children of mild mental retardation. *Psychological Science (China)*, 30(3), 564-568.
- Hallez. (2022). Development of time perception in children. In Shankland, *Anglais pour Psychologue*.
- Hallez, Q., & Droit-Volet, S. (2017). High levels of time contraction in young children in dual tasks are related to their limited attention capacities. *Journal of Experimental Child Psychology*, 161, 148-160. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2017.04.013>
- Huizinga, M., Dolan, C. V., & van der Molen, M. W. (2006). Age-related change in executive function : Developmental trends and a latent variable analysis. *Neuropsychologia*, 44(11), 2017-2036. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.01.010>
- Inserm. (2016). *Déficiences intellectuelles*. Inserm - La science pour la santé. <https://www.inserm.fr/information-en-sante/expertises-collectives/deficiences-intellectuelles>
- Janeslätt, G., Ahlström, S. W., & Granlund, M. (2019). Intervention in time-processing ability, daily time management and autonomy in children with intellectual disabilities aged 10-17 years—A cluster randomised trial. *Australian Occupational Therapy Journal*, 66(1), 110-120. <https://doi.org/10.1111/1440-1630.12547>
- Janeslätt, G., Granlund, M., Alderman, I., & Kottorp, A. (2008). Development of a new assessment of time processing ability in children, using Rasch analysis. *Child: care, health and development*, 34, 771-780. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2214.2008.00865.x>
- Janeslätt, G., Granlund, M., Kottorp, A., & Almqvist, L. (2009). Patterns of Time Processing Ability in Children with and without Developmental Disabilities. *Journal of Applied Research in Intellectual Disabilities*, 23, 250-262. <https://doi.org/10.1111/j.1468-3148.2009.00528.x>
- Janeslätt, G., Granlund, M., Kottorp, A., & Almqvist, L. (2010). Patterns of Time Processing Ability in Children with and without Developmental Disabilities. *Journal of Applied Research in Intellectual Disabilities*, 23(3), 250-262. <https://doi.org/10.1111/j.1468-3148.2009.00528.x>

- Kail, R. (1992). General slowing of information-processing by persons with mental retardation. *American Journal on Mental Retardation*, 97(3), 333-341.
- Lanfranchi, S., Cornoldi, C., & Vianello, R. (2004). Verbal and visuospatial working memory deficits in children with Down syndrome. *American Journal of Mental Retardation: AJMR*, 109(6), 456-466. [https://doi.org/10.1352/0895-8017\(2004\)109<456:VAVWMD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1352/0895-8017(2004)109<456:VAVWMD>2.0.CO;2)
- Lechuga, M. T., Moreno, V., Pelegrina, S., Gómez-Ariza, C. J., & Bajo, M. T. (2006). Age differences in memory control: Evidence from updating and retrieval-practice tasks. *Acta Psychologica*, 123, 279-298. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2006.01.006>
- Li, Y., Gu, J., Zhao, K., & Fu, X. (2022). Developmental trajectory of time perception from childhood to adolescence. *Current Psychology*. <https://doi.org/10.1007/s12144-022-03526-9>
- Loranger, Pepin M., Doyon M., & Blais, M.-C. (2000). Mesures de vitesse des opérations mentales chez des enfants présentant une déficience intellectuelle. *REVUE FRANCOPHONE DE LA DEFICIENCE INTELLECTUELLE*, Vol. 11 n° 2, 117-128.
- Luciana, M., Conklin, H. M., Hooper, C. J., & Yarger, R. S. (2005). The development of nonverbal working memory and executive control processes in adolescents. *Child Development*, 76(3), 697-712. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2005.00872.x>
- McCormack, T., Brown, G. D., Maylor, E. A., Darby, R. J., & Green, D. (1999). Developmental changes in time estimation: Comparing childhood and old age. *Developmental Psychology*, 35(4), 1143-1155. <https://doi.org/10.1037//0012-1649.35.4.1143>
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The Unity and Diversity of Executive Functions and Their Contributions to Complex “Frontal Lobe” Tasks: A Latent Variable Analysis. *Cognitive Psychology*, 41(1), 49-100. <https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734>
- Morris, N., & Jones, D. M. (1990). Memory updating in working memory: The role of the central executive. *British Journal of Psychology*, 81(2), 111. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1990.tb02349.x>
- Ogden, R. S., MacKenzie-Phelan, R., Montgomery, C., Fisk, J. E., & Wearden, J. H. (2019). Executive processes and timing: Comparing timing with and without reference memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 72(3), 377-388. <https://doi.org/10.1177/1747021817751869>

- Ogden, R. S., Salominaite, E., Jones, L. A., Fisk, J. E., & Montgomery, C. (2011). The role of executive functions in human prospective interval timing. *Acta Psychologica, 137*(3), 352-358. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2011.04.004>
- Ogden, R. S., Wearden, J. H., & Montgomery, C. (2014). The differential contribution of executive functions to temporal generalisation, reproduction and verbal estimation. *Acta Psychologica, 152*, 84-94. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2014.07.014>
- Peirce, J., Gray, J. R., Simpson, S., MacAskill, M., Höchenberger, R., Sogo, H., Kastman, E., & Lindeløv, J. K. (2019). PsychoPy2: Experiments in behavior made easy. *Behavior Research Methods, 51*(1), 195-203. <https://doi.org/10.3758/s13428-018-01193-y>
- Pelegrina, S., Lechuga, M. T., García-Madruga, J. A., Elosúa, M. R., Macizo, P., Carreiras, M., Fuentes, L. J., & Bajo, M. T. (2015). Normative data on the n-back task for children and young adolescents. *Frontiers in Psychology, 6*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01544>
- Rabbitt, P. (Éd.). (1997). *Methodology Of Frontal And Executive Function*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203344187>
- Rattat, A.-C. (2010). Bidirectional interference between timing and concurrent memory processing in children. *Journal of Experimental Child Psychology, 106*(2-3), 145-162. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.02.001>
- Rattat, A.-C., & Collié, I. (2020). *Duration judgments in children and adolescents with and without mild intellectual disability*.
- Rattat, A.-C., & Droit-Volet, S. (2005). The long-term retention of time : A developmental study. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology B: Comparative and Physiological Psychology, 58B*, 163-176.
- Saccuzzo, D. P., Kerr, M., Marcus, A., & Brown, R. (1979). Input capability and speed of processing in mental retardation. *Journal of Abnormal Psychology, 88*, 341-345. <https://doi.org/10.1037/0021-843X.88.4.341>
- Snyder, H. R., Miyake, A., & Hankin, B. L. (2015). Advancing understanding of executive function impairments and psychopathology : Bridging the gap between clinical and cognitive approaches. *Frontiers in Psychology, 6*, 328. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00328>
- Szelag, E., Kowalska, J., Rymarczyk, K., & Pöppel, E. (2002). Duration processing in children as determined by time reproduction : Implications for a few seconds temporal window. *Acta Psychologica, 110*, 1-19. [https://doi.org/10.1016/S0001-6918\(01\)00067-1](https://doi.org/10.1016/S0001-6918(01)00067-1)

- Van der Molen, M. J., Van Luit, J. E. H., Jongmans, M. J., & Van der Molen, M. W. (2007). Verbal working memory in children with mild intellectual disabilities. *Journal of Intellectual Disability Research: JIDR*, 51(Pt 2), 162-169. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2788.2006.00863.x>
- Wearden, J. H. (2003). Applying the scalar timing model to human time psychology : Progress and challenges. In *Time and mind II: Information processing perspectives* (p. 21-39). Hogrefe & Huber Publishers.
- Zagaria, T., Antonucci, G., Buono, S., Recupero, M., & Zoccolotti, P. (2021). *Executive Functions and Attention Processes in Adolescents and Young Adults with Intellectual Disability*. 17.
- Zakay, D. (2012). Experiencing time in daily life. *Psychologist*, 25, 578-581.

Appendix

Table 2

Raw data for the verbal running span task (percentage of correct responses. \pm sd)

Age	10-12 years old	13-16 years old	17-20 years old
TD	75.620 (\pm 3.74)	71.910 (\pm 3.73)	85.490 (\pm 1.94)
MID	25.500 (\pm 4.18)	33.640 (\pm 4.12)	44.750 (\pm 4.25)

TD : typically developing and MID : mild intellectual disability

Table 3

Raw data for the spatial running span task (percentage of correct responses + sd)

Age	10-12 years old	13-16 years old	17-20 years old
TD	86.260 (\pm 2.92)	91.510 (\pm 2.15)	95.830 (\pm 1.48)
MID	26.500 (\pm 4.92)	31.640 (\pm 4.83)	46.910 (\pm 5.40)

TD : typically developing and MID : mild intellectual disability

Table 4

Raw data for the 2-back task (percentage of correct responses + sd)

Age	10-12 years old	13-16 years old	17-20 years old
TD	78.89 (\pm 1.46)	78.11 (\pm 1.39)	85.47 (\pm 0.74)
MID	56.93 (\pm 2.87)	61.65 (\pm 2.12)	67.37 (\pm 1.95)

TD : typically developing and MID : mild intellectual disability

Table 5

Raw data for the temporal reproduction task (accuracy score + sd and variability score + sd)

Age	10-12 years old	13-16 years old	17-20 years old
TD			
Accuracy score	0.19 (\pm 0.072)	0.058 (\pm 0.043)	0.16 (\pm 0.042)
Variability score	0.32 (\pm 0.019)	0.34 (\pm 0.024)	0.25 (\pm 0.020)
MID			
Accuracy score	0.44 (\pm 0.13)	0.24 (\pm 0.11)	0.24 (\pm 0.079)
Variability score	0.53 (\pm 0.045)	0.52 (\pm 0.048)	0.42 (\pm 0.037)

TD : typically developing and MID : mild intellectual disability

1.2. Article 3: Deficits of Duration Estimation in individuals aged 10-20 years old with Idiopathic Mild Intellectual Disability: The role of inhibition, shifting and processing speed

Résumé en français

Plusieurs études ont déjà mis en évidence une altération de plusieurs fonctions cognitives en lien avec le TDIL dont l'inhibition et la flexibilité (e.g., Danielsson et al., 2012; Spaniol & Danielsson, 2022; Van der Molen et al., 2007; Zagaria et al., 2021). En revanche, la VTI n'a encore jamais été caractérisée dans cette population spécifique. Par ailleurs, le lien entre ces fonctions cognitives et l'estimation des durées a été montré de manière empirique à plusieurs reprises (e.g., Baudouin et al., 2006; Brown, 2006; Droit-Volet & Hallez, 2019; Droit-Volet & Zélandi, 2013; Ogden et al., 2011, 2014, 2019; Rattat, 2010; Rattat & Chevalier, 2020; Zélandi & Droit-Volet, 2011). L'objectif de cette étude est double : 1) mieux caractériser la courbe développementale de ces fonctions cognitives dans le TDIL, et 2) préciser leur implication dans l'estimation des durées. Dans la continuité de l'étude précédente, nous postulons que les difficultés d'estimation des durées observées chez les individus porteurs d'un TDIL (Gourlat et al., 2023; Rattat & Collié, 2020) pourraient être dues à une altération des FE et de la VTI.

Les performances d'estimation des durées, d'inhibition, de flexibilité et de VTI des participants porteurs d'un TDIL idiopathique sans trouble associé âgés de 10 à 20 ans (N = 79) ont été comparées à celles de participants au développement typique (N = 81) ; il s'agit du même échantillon que celui de l'Article 2 présenté précédemment. L'estimation des durées a été évaluée via la tâche de reproduction temporelle utilisée dans l'Article 2. Les performances d'inhibition ont été évaluées à l'aide d'une tâche de Go no-Go (GNG, Annexe 1.6), la Multisource Interference Task (MIT, Annexe 1.7) et la Real Animal Size Interférence Task (RAST, Annexe 1.8). La flexibilité a été évaluée via la tâche de tri de cartes du Wisconsin Card Sorting Test (WCST, Annexe 1.9), l'Alternating Running Task Switching (ARTS Annexe 1.10) et la Cued Task Switching (CTS Annexe 1.11). Enfin, la VTI a quant à elle été mesurée avec la tâche de Choice Reaction Time (CRT, Annexe 1.12). Les données recueillies concernant les tâches évaluant l'inhibition et la flexibilité n'ont pas montré de réelle validité de construit (elles n'étaient pas suffisamment corrélées entre elles). Les performances ont donc été analysées de manière indépendante pour chaque tâche.

Les résultats ont mis en évidence que les enfants et les adolescents porteurs d'un TDIL présentaient des performances d'inhibition, de flexibilité et de VTI inférieures à celles des enfants et des adolescents TV appariés sur l'AC, et ce dans toutes les tâches à l'exception de l'ARTS qui mesure la flexibilité. De plus, les performances des participants porteurs d'un TDIL se sont améliorées avec l'âge dans 3 des tâches proposées : une tâche d'inhibition (GNG), une tâche de flexibilité (WCST) et la tâche de VTI (CRT). Les difficultés en termes de variabilité temporelle dans la tâche de reproduction dues au TDIL et à l'âge sont majoritairement expliquées par les performances d'inhibition issues de la tâche GNG. Les difficultés en termes de précision temporelle dans la tâche de reproduction dues au TDIL et à l'âge sont quant à elles majoritairement expliquées par les performances de VTI issues de la tâche CRT. Ces données suggèrent que les capacités d'inhibition (mesurées avec la tâche GNG) et la VTI seraient des prédicteurs des difficultés observées chez les individus porteurs d'un TDIL pour reproduire des durées. Les résultats de l'Article 3 renforcent ainsi l'idée défendue dans l'Article 2 selon laquelle les difficultés d'estimation des durées chez les individus porteurs d'un TDIL ne seraient pas dues à un déficit du traitement de l'information temporelle mais bien à d'autres difficultés cognitives.

Cet article empirique a été soumis pour publication dans la revue *Journal of Intellectual Disability* en Septembre 2024 et a fait l'objet d'une communication orale au congrès international de l'ESCOP en septembre 2024 à Porto (Portugal). Il fera également l'objet d'une communication affichée au congrès FAST les 17 et 18 Octobre 2024 à Paris.

Abstract

Mild Intellectual Disability (MID) is a neurodevelopmental disorder characterized by multiple cognitive deficits, especially in duration estimation, executive functions and information processing speed. In addition, the role of these cognitive functions has been demonstrated in duration estimation. In the present study, the duration estimation, inhibition, shifting and processing speed performances of participants with idiopathic MID without associated disorders (N = 79), aged between 10 and 20 years, were compared with those of typical participants (N = 81). Results showed difficulties in all cognitive functions in individuals with MID (with the exception of one shifting task). Moreover, our results highlight - for the first time - the role of inhibition abilities and processing speed not only in the increase in duration estimation abilities with age, but also in the deficits observed in MID. To conclude, deficits in duration estimation in MID are due to impairment of other cognitive functions.

Key word

Duration estimation, Inhibition, Mild Intellectual disability, Processing speed, Shifting

Introduction

Mild intellectual disability (MID) is a neurodevelopmental disorder characterized by difficulties in both intellectual and adaptive functioning (with an intelligence quotient (IQ) of 50 to 70 on a standardized test) that emerges during the developmental period (INSERM, 2016). MID individuals thus have a limited understanding of risk in social situations associated with immature social judgment (i.e., social area), an occupation that requires few or fewer cognitive skills (i.e., practical area), as well as a highly pragmatic problem-solving technique compared to typically developing (TD) individuals (i.e., conceptual area) (APA, 2013). The prevalence of MID in France (1 to 2%; APA, 2013; INSERM, 2016) and in the world (1% in 2009; Maulik et al., 2011) is high, and 80% of all MID is idiopathic, indicating that its etiology is unknown (INSERM, 2016). However, the clinical profile of cognitive disabilities associated with idiopathic MID is largely imprecise; therefore, more work is needed to better understand this disorder and define specific care for this population. In the present study, we investigated the links between the developmental trajectories of duration estimation and inhibition, shifting, and

processing speed in TD and MID children and adolescents aged 10 to 20 years. Several studies have highlighted cognitive difficulties (i.e., conceptual area) in people with idiopathic MID (for a recent review, see Gourlat et al., in press); more specifically, duration estimation difficulties (Gourlat et al., 2023; Rattat & Collié, 2020). Our previous study (Gourlat et al., 2023) supported the hypothesis that the difficulties in duration estimation in MID individuals may be largely due to their lower working memory updating abilities. The present study focused on the link between duration estimation skills and other cognitive components, namely inhibition, shifting, and processing speed. We intended to examine, from a developmental perspective, whether the difficulties in estimating time-duration in children and adolescents with MID compared to TD children and adolescents are related to not only lower updating abilities but also lower inhibition, shifting, and processing speed abilities.

Duration estimation is a complex cognitive process that involves the subjective evaluation of a range of time (Block & Zakay, 2006). Accurate duration estimation is essential for daily functioning. For example, it enables individuals to reproduce, anticipate, and compare the duration of everyday actions. Inaccurate estimates of time-duration can have negative consequences, such as delays in planned activities and difficulties in meeting deadlines and managing time in various contexts, including work, education, and social interactions (Barkley et al., 2001). Various tasks can be used to assess the ability to estimate time, like the reproduction task that has already been used in numerous studies with children (e.g., Droit-Volet & Zélanti, 2013; Gautier & Droit-Volet, 2002; Hallez, 2020; Hallez et al., 2019; Hallez & Droit-Volet, 2017; Rattat & Chevalier, 2020). In this task, the participant must reproduce a target duration that has been previously presented to him/her. Duration estimation processes can be theorized using the internal clock model, which asserts the existence of an internal mechanism for measuring time based on the perception of stimuli and environmental events (Gibbon, Church, & Meck, 1984).

According to this model, duration estimation depends on the number of pulses generated continuously by a pacemaker and transferred into an accumulator through a switch, which can be opened or closed, although the transition of pulses can only be done when it is closed (for a review, see Wearden, 2003). The second level of processing, the memory level, corresponds to the storage of duration in memory. The time-duration representation is initially stored short-term in working memory before eventually being stored in longer-term reference memory if it is relevant to the task. Thus, when reproducing a previously presented duration, the closed switch enables pulses to be accumulated and counted until the total number of pulses reaches

that previously stored in memory. In addition, in the third and final level, the decisional level, the individual must compare one or more time- durations stored in reference memory with the duration in working memory to make a temporal judgment. For example, in the temporal reproduction task, the individual must reproduce as accurately as possible the reference duration of a previously presented stimulus. When this reference duration is presented, the individual accumulates a certain number of impulses (internal clock level). This information is then transferred to the working memory (memory level) and then compared to the reference duration (decisional level). Within the framework of the internal clock model, being able to accurately track the accumulation of pulses from the pacemaker likely requires executive resources, i.e., cognitive processes that optimize performance and identify the most appropriate behaviors to achieve a specific goal through the selection and simultaneous activation of different processes (Gilbert & Burgess, 2008). Numerous studies have highlighted significant correlations between performance on executive tasks and performance on duration estimation tasks (e.g., Baudouin et al., 2006; Brown, 2006; Droit-Volet & Zélanti, 2013; Ogden et al., 2011, 2014, 2019; Rattat, 2010; Rattat & Chevalier, 2020; Zélanti & Droit-Volet, 2011). In particular, Ogden et al. (2014) suggested that the duration reproduction task is more executively demanding than other temporal tasks, such as discrimination tasks, and reported a significant correlation between duration reproductions and performance on both working memory updating and shifting tasks but not on inhibition task. More recently, Rattat and Chevalier (2020) showed that inhibitory control is required to reproduce durations accurately and that improved ability to accurately reproduce durations with age may be due to the development of executive abilities, particularly inhibitory abilities.

Regarding the involvement of inhibition resources in duration estimation, the literature actually offers somewhat contradictory results, with some studies highlighting a link between inhibition resources and duration estimation (e.g., Brown, 2006; Brown et al., 2013; Rattat & Chevalier, 2020) and others not (e.g., Fortin et al., 2010; Ogden et al., 2011, 2014). Inhibition is a cognitive process that involves suppressing automatic or dominant responses or thoughts (for a review, see Diamond, 2013). The contradictory results on inhibition may be partly due to the used task, with inhibition effects on duration estimations being more accentuated in more complex tasks (Brown et al., 2013). As inhibition plays a crucial role in regulating attentional resources, we can assume that individuals with inhibition difficulties may struggle to filter out irrelevant stimuli, which increases cognitive load and reduces the attentional resources available for estimating durations (e.g., Block et al., 2010; Droit-Volet & Zélanti, 2013). Diminished attentional resources can lead to more interference, disrupting the functioning of

the internal clock's switch, which controls the allocation of attention to temporal information (Block & Zakay, 1997).

Consequently, individuals may have difficulties in accurately perceiving and processing durations. Inhibition difficulties can also impair updating working memory processes involved in the storage and manipulation of temporal information. Indeed, duration estimation requires updating resources as a part of online maintenance, time tagging, and replacing information in working memory (e.g., Brown & Friehe, 2000; Ogden et al., 2011). In the reproduction task, the participant must monitor and maintain in memory two durations (the target duration and the reproduced duration). Disruptions in inhibition may hinder these processes, leading to inaccurate duration estimation and memory retrieval (Barkley et al., 2001).

Similarly, high shifting performances have been associated with high accuracy in a temporal reproduction task (e.g., Brown et al., 2013; Wearden et al., 2010). Shifting corresponds to the ability to alternate between multiple tasks, rules, or thoughts and, thus, to adapt to different situations (for a review, see Diamond, 2013). In this task, shifting resources are required to alternate between the reproduced duration and the memory representation of the target duration (Ogden et al., 2014) in order to compare them and determine when the reproduced duration should be stopped. Thus, according to the internal clock model, deficits in shifting can also impair duration estimation.

In individuals with MID, studies have revealed difficulties in both inhibition and shifting processes (e.g., Danielsson et al., 2012; Spaniol & Danielsson, 2022; Van der Molen et al., 2007; Zagaria et al., 2021). More precisely, specific inhibitory control difficulties associated with MID have been noted in young children aged 4 to 7 years (Grada & Simoni, 2018), older children aged 10 to 14 years (Gligorović & Buha Đurović, 2014), and adolescents aged 15 to 23 years (Bexkens et al., 2014; Zagaria et al., 2021). These individuals do not mobilize their inhibitory resources in the same way as TD individuals (i.e., preserved emotional inhibition and deficient behavioral inhibition) (Treillet et al., 2014), and this inhibition deficit correlates with externalized behavior disorders in MID individuals (Schuiringa et al., 2017). However, these studies had methodological limitations, such as the lack of a control group (Gligorović & Buha Đurović, 2014; Grada & Simoni, 2018; Schuiringa et al., 2017) and the inclusion of participants with different levels of ID (moderate ID, Treillet et al., 2014; borderline ID, Bexkens et al., 2014; Schuiringa et al., 2017), which can affect the interpretation of the results. Regarding shifting skills, while some works have shown no link between shifting performance and IQ (e.g., Friedman et al., 2006), others have reported a deficit in shifting abilities (Delis et al.,

2001) in ID (e.g., Erostarbe-Pérez et al., 2022) and MID individuals (e.g., Gligorović & Buha, 2013). Danielsson et al. (2012) showed that the shifting abilities of 11 to 15-year-old children with MID on a verbal fluency task were lower than those of TD individuals matched on chronological age. Contrary to studies that used shifting tasks also involving various cognitive processes, such as inhibition or short-term memory, a recent study (Kitamura et al., 2022) using a shifting task with minimal involvement of cognitive processes other than shifting (the Truck Loading Task developed by Fagot & Gauvain, 1997) showed that shifting abilities in MID individuals did not differ from those of TD individuals matched on both mental and chronological age, despite a higher variability in individuals with MID's performance. Thus, considering the few studies and the heterogeneous results on shifting, it is difficult to clearly conclude whether this process is preserved or altered in MID. Further studies are needed to clarify this issue.

To sum up, compared to TD individuals, MID individuals show lower performance on inhibition tasks. The results are more heterogeneous for shifting skills, as they appear to be more task-dependent. From a developmental point of view and despite some controversy, the development of different executive components (inhibition and shifting) appears to mature relatively independently in TD individuals until adolescence (for a recent review, see Theodoraki et al., 2020). No study has yet looked at the development from childhood to adulthood in individuals with MID.

The speed with which information is processed is a cognitive skill frequently associated with executive functions (Kail & Salthouse, 1994; Miyake et al., 2000). Information processing speed refers to the efficiency with which individuals can perceive, interpret, and respond to incoming information (Salthouse, 1996). It is considered a low-level process that underlies other more complex cognitive functions, such as executive functions (Lee et al., 2013; Miyake et al., 2000). Droit-Volet and Zelanti (2013) also demonstrated that information processing speed is the best predictor of individual variations in time sensitivity (i.e., temporal variability). More precisely, their results showed that faster information-processing speed was associated with participants' higher sensitivity to time (i.e., less variable time performance). Insofar as the speed of information processing is slower in individuals with low IQ (Loranger et al., 2000) and in ID individuals (Kail, 1992), we can, therefore, expect to observe lower performance in the reproduction task in MID individuals than in TD individuals.

The current research adopted a developmental perspective to assess duration estimation, inhibition, shifting, and information processing speed in a cohort of TD and idiopathic MID individuals aged 10-20. Duration estimation abilities were assessed using a reproduction task. Inhibition and shifting abilities were each analyzed using three tasks to mitigate problems of task impurity and to investigate individual performance with respect to the cognitive construct. As Rabitt (1997) and Miyake et al. (2000) argued, measuring an executive function directly is problematic because it operates within other cognitive processes. Thus, to address these challenges and ensure a more reliable measure, composite scores for probing inhibition and shifting derived from three experimental tasks had to be computed. Importantly, all tasks used in the present study were available to participants of all age ranges, facilitating examination of the developmental trajectory of duration estimation, inhibition, shifting, and information processing speed abilities not only in TD individuals but also in those with idiopathic MID.

Consequently, this approach made it possible to investigate the interaction between the cognitive abilities of interest as a function of age and MID status. Drawing on the existing literature, we expected to demonstrate difficulties in cognitive abilities (i.e., inhibition, shifting, information processing speed) in individuals with idiopathic MID and a delayed developmental trajectory of these capacities compared to chronologically age-matched TD children and adolescents. Additionally, we hypothesized a significant link between cognitive performance and performance on the reproduction task, with idiopathic MID individuals showing decreased difficulty in reproducing duration after accounting for their cognitive difficulties.

Method

Participants

The present study included the same participants as in a previous study on the implication of working memory updating in duration estimation capacities in TD and idiopathic MID children and adolescents aged 10 to 20 years (Gourlat et al., 2023). The final sample comprised 160 participants, including 81 TD individuals and 79 individuals with idiopathic MID without associated disorders. The principal characteristics of this final sample are presented in Table 1.

Table 1

Characteristics of the participants' groups.

GROUP	AGE		
	10-12 years old	13-16 years old	17-20 years old
TD			
N	27	27	27
% boys (n)	51.85 (14)	67.00 (18)	18.52 (5)
mean age	11.22	13.56	18.63
sd	0.64	0.89	1.11
MID			
N	25	27	27
% boys (n)	76.00 (19)	59.26 (16)	55.56 (15)
mean age	10.76	14.56	18.11
sd	0.93	1.15	0.85

TD : typically developing and MID : mild intellectual disability. N = number; sd = standard deviation.

As described in Goulat et al. (2023), all participants were recruited from five primary and secondary educational institutions, as well as universities, along with ten medico-social establishments located in the southwest of France, more specifically in Occitanie. Each participant's respective institution directly confirmed the diagnosis of idiopathic MID. Rigorous screening procedures were implemented to ensure that individuals with idiopathic MID were not diagnosed with any co-existing disorder(s), such as dyslexia, dysorthographia, Attention Deficit Hyperactivity Disorder (ADHD), or Autism Spectrum Disorder (ASD), nor did they manifest any other neurological or genetic pathologies. Additionally, the age of TD participants had to correspond with their respective levels of education. Individuals with any sensory impairments related to vision, perception, or motor skills that would likely interfere with the performance of experimental tasks were excluded.

Prior to participation, informed consent was obtained from participants and, in the case of minors, from their parents. The consent of the directors of schools and medico-social establishments was also obtained. The Research Ethics Committee of Toulouse University (IRB N°. 2020-317) approved the study protocol, which adhered to the ethical principles outlined in the Declaration of Helsinki.

Materials and Tasks

As mentioned previously, the present study was part of a larger study on duration estimation abilities and executive functions in TD and MID individuals. The present study encompassed eight tasks. The first session included a temporal reproduction task (already described in our previous manuscript, Goulat et al., 2023) and an information processing speed task (i.e., choice reaction time task). The second session comprised three inhibition tasks (i.e., Go no-Go task, Real Animal Size Task, Multisource Interference Task), while the third session

incorporated three shifting tasks (i.e., Wisconsin Card Sorting Test, Alternative Run Task Shifting, and Cued Task Shifting). Task sequences within sessions and session order were counterbalanced across participants. The only exception was that Session 1 was performed first. All tasks were adapted from pre-existing validated tasks, tailored not only to accommodate the clinical characteristics of MID but also to suit the participants' age ranges, ensuring uniform management of tasks. Stimuli were presented, and responses were recorded on a laptop via a homemade program developed in Python programming language (version 3.9) using the PsychoPy library (version 2021.1.0; Peirce et al., 2019). Participants' responses were recorded using two millisecond-accurate response boxes: a Cedrus RB-740 response box was used in sessions 1 and 3, and a custom-built (4x4) 16-key response box was utilized in session 2 (further details are provided below).

Evaluation of Duration Estimation Abilities

Duration Reproduction Task. The full description of this task can be found in Goulat et al. (2023). Briefly, in this task, the participants had to reproduce the reference duration of a stimulus (from 400 to 800 ms) as accurately as possible. The dependent variables (DVs) for this task were the accuracy score, corresponding to the mean difference between temporal reproduction and stimulus duration divided by stimulus duration (from -1 to 1; a score close to 0 is associated with better performance), and the variability score (standard deviation/mean of accuracy score).

Evaluation of Inhibition Abilities

Go No-Go Task (GNG). Inspired by the work of Chevalier et al. (2014), the participants in this task had to press the response box as quickly as possible after the presentation of a target stimulus (a yellow or red fish) but inhibit the response (not press the response box) when a non-target stimulus (a blue or purple fish) appeared on the screen. Participants used two buttons on the response box to perform the task: a green button to place themselves in the fishing boat and a blue button to catch the fish. First, they had to hold down the green button to place themselves in the boat. Subsequently, they were presented with the next trial (the fish appears). If they wished to catch the fish, they could release the green button (exit the boat) and press the blue button (catch the fish). Finally, they returned to the boat (green button) for the next trial. When a distractor appeared, the participants had to hold down the green button (stay in the boat) and not press the blue button. This task consisted of a demonstration phase, a training phase, and a test phase comprising 4 blocks of 40 trials. Each block contained 10 Go trials and 30 no-Go

trials. The position of the key on the box (right or left) and the fish not to be caught (4 combinations) were counterbalanced. The DV for this task was the inhibition sensitivity score (d'). Higher d' was associated with better performance. The reliability score for this task was 0.98 (split-half method).

Multisource Interference Task (MIT). Inspired by Bush and Shin's study (2006), in this task, participants were given a keyboard with three keys in a row, representing the numbers 1, 2, and 3. A series of three numbers appeared every 2 seconds in the center of the screen. One digit was always different from the other two. Participants had to identify which number was different and press the corresponding key. Two types of blocks were performed: control blocks and interference blocks. In control blocks, the target number always corresponded to its position on the response button (for example, the number "1" would appear in the first position). In interference blocks, the target never corresponded to its position on the response button, and distractors were themselves potential targets (e.g., 233, the correct answer is "2"). This task consisted of a demonstration phase, a training phase, and a test phase comprising 18 blocks of 24 trials (9 control blocks and 9 interference blocks). The DV for this task was the interference cost of reaction time (RT difference between interference and control blocks in ms). Lower interference was linked to better performance. The reliability score for this task was 0.99 (split-half method).

Real Animal Size Task (RAST). Adapted from Rattat and Chevalier's study (2020), in this task, two drawings of different animals of varied sizes (one large and one small) were presented side by side in each trial. Participants were asked to press a key on the side that showed the animal that was larger in real life. In this test, two situations were tested: congruent trials where the animal that was taller in real life was also visually taller on the screen, and incongruent trials where the larger animal was depicted as visually smaller, creating interference between real-life size and visual size. In these trials, participants had to inhibit visually salient size on the screen to respond to the size of the animal in real life. This task consisted of a demonstration phase, a training phase, and a test phase comprising 48 trials (24 congruent trials and 24 incongruent trials) presented in random order, with an inter-trial interval of 1500 ms. The DV was the interference cost (RT incongruent – RT congruent in ms). Lower interference cost was associated with better performance. The reliability score for this task was 0.98 (split-half method).

Evaluation of Shifting Abilities

Wisconsin Card Sorting Test Task (WCST). Based on Cianchetti et al.'s study (2007), participants had to sort 48 cards according to a rule (shape, color, number), placing the card on the screen in one of the 4 piles shown at the top of the screen. The sorting rule changed after 6 correct categorizations. Shifting performance is essentially assessed by the number of sorting errors and, in particular, perseveration errors (continuing to apply an obsolete rule). This task consisted only of a test phase comprising 48 trials. If the participants managed to identify successfully all 3 criteria (shape, color, number) before the end of the task, it stops. If not, the task stopped after 48 trials. The DV for this task was the number of perseverative errors. A higher number of perseverative errors was associated with lower performance.

Alternative Run Shifting Task (ARTS). Adapted from Karayanidis et al.'s study (2013), in this task, successive stimuli appear at 4 different screen locations (top-right, top-left, bottom-left, bottom-right). A different rule had to be applied depending on where they appeared. The stimulus was either a leaf or a flower shown on the top, along with either a bird or a fish shown on the bottom. The stimuli appeared clockwise, one after the other. Shifting performance was essentially assessed by the percentage of correct responses and the calculation of the temporal cost of shifting. The task consisted of a univalent phase for vegetation (leaf or flower on the top - 2 blocks of 16 trials), a univalent phase for animals (bird or fish on the bottom - 2 blocks of 16 trials), a bivalent phase for vegetation (the participant faced all stimuli in all locations but responded only to vegetation stimuli - 2 blocks of 16 trials), a bivalent phase for animals (the participant faced all stimuli in all locations but responded only to animal stimuli 2 blocks of 16 trials), and a mixed phase comprising both bivalent vegetation and animal stimuli (the participant faced all stimuli in all locations and responded to both vegetation and animal stimuli - 4 blocks of 16 trials). The DV for this task was the shifting cost (RT from switched trials – RT from repeated trials in ms). Lower shifting cost was associated with higher performance. The reliability score for this task was 0.95 (split-half method).

Cued Task Shifting (CTS). Based on Chevalier et al.'s study (2018), the participants were presented with four toys to sort according to shape (car or teddy bear) or color (blue or pink). The participants had to arrange the toy according to a specific rule (color or shape) presented on the screen. The task consisted of two non-switch phases (the color phase and the shape phase) and a mixed phase composed of both color and shape trials (switched trials). In each phase, feedback appeared after the answer was given (green or red smiley). There was no

time limit, although the participants were asked to do it as quickly and correctly as possible. Specifically, they had to put the object in the correct box by pressing one of the two illuminated buttons on the boxes. This task consisted of a color phase (2 blocks of 16 trials), a shape phase (2 blocks of 16 trials), and a mixed phase (8 blocks of 16 trials). The order of the two first phases (color or shape) was counterbalanced. The DV for this task was the shifting cost (switch RT – non-switched RT in ms). Lower shifting cost was linked to higher performance. The reliability score for this task was 0.98 (split-half method).

Evaluation of Information Processing Speed

Choice Reaction Time Task (CRT). Based on Albinet et al.'s (2012) work, participants were asked to respond as quickly and accurately as possible to one of two stimuli presented: if the arrow displayed was pointing to the right (>), the participant pressed the right key with their right hand, and if the arrow was pointing to the left (<), they had to press the left key with its left hand. The arrows were displayed on the computer screen until the response was given. Before each trial, a fixation point (+) was briefly presented. This task included a demonstration phase, a training phase, and a test phase comprising 2 blocks of 44 trials. The DV for this task was the RT (ms). Shorter RT was associated with higher performance. The reliability score for this task was 0.99 (split-half method).

Computation of a Composite Score Reflecting Inhibition and Shifting

A Cronbach's alpha was computed from the z-scores (using means and standard deviations for the whole group) of the inhibition tasks and from the z-scores of the shifting tasks to assess how well each three tasks of a component measured a single underlying construct. Unfortunately, Cronbach's alphas were too low to compute a relevant composite score (Inhibition: $\alpha = .507$; Shifting: $\alpha = .094$). Accordingly, we used the raw scores of each task instead of a composite score.

Procedure

Participants completed individual testing sessions in a quiet, isolated environment over three separate sessions, with a minimum interval of 30 minutes between sessions to ensure adequate rest. Positioned in front of a computer screen and a response box, participants were seated on a chair during testing. Before the beginning, the experimenter provided detailed instructions regarding test procedures, ensuring participants' comprehension. Anonymized participant data were recorded on the testing computer prior to initiation. Throughout the

sessions, adherence to epidemic-related barrier measures was rigorously maintained, including disinfection of equipment between participants and mandatory mask usage. If participants exhibited any signs of discomfort or unease, testing could be halted, although such instances did not occur. On average, each session lasted between 30 and 45 minutes, including scheduled breaks.

Statistical Analyses

The main aims of the present study were to verify that MID children and adolescents present deficits in inhibition, shifting, and processing speed performance compared to TD chronological age-matched children and adolescents and to examine the extent to which those cognitive deficits may account for their deficits in duration estimation abilities. To this end, we first conducted multiple analyses of variance (MANOVAs) followed by univariate analyses of variance (ANOVAs) on each DV of the seven cognitive tasks (three tasks examining inhibition, three tasks examining shifting, and one task examining information processing speed) with group (MID vs. TD) and age (10-12; 13-16; 17-20 years) as between-subjects factors. For the MIT and CRT tasks, we controlled for the effect of gender (ANCOVAs with 1 = male; 2 = female), as the main effect of gender was significant for these tasks. Post-hoc analyses used Bonferroni corrections for multiple comparisons. Second, we conducted bivariate partial correlations (controlling for gender) between each cognitive measure and the two performance indices of the duration reproduction task. Finally, we ran multiple linear regression analyses involving the cognitive measures, which demonstrated a significant correlation with the measures of the temporal performance as predictors. The significance level was set at $p \leq .05$. Partial estimated effect sizes (η^2_p) were reported for significant effects.

Results

Duration Estimation

Temporal Reproduction Task

The results for this task were already presented in our previous manuscript (Gourlat et al., 2023). We summarize below the main results relevant to the present study and refer the interested reader to the original article for details.

Accuracy Score. Participants with MID demonstrated significantly less accuracy in the reproduction of durations. In particular, while all participants overestimated the shortest durations (400 to 530 ms), this temporal overestimation was more marked in MID participants (0.31 ± 0.55) than in TD ones (0.13 ± 0.28). Despite the accuracy score significantly differing as a function of age, none of the 2-2 comparisons showed any significant difference between the age groups (10-12 years old: 0.31 ± 0.55 ; 13-16 years old: 0.15 ± 0.43 ; 17-20 years old: 0.20 ± 0.33).

Variability Score. Overall, the variability score was significantly lower for the 17-20 years old group (0.36 ± 0.17) compared to the two younger groups, which did not differ from each other (10-12 years old: 0.42 ± 0.20 ; 13-16 years old: 0.43 ± 0.22). Moreover, MID participants consistently showed greater variability in their temporal reproductions (0.49 ± 0.23) compared to TD participants (0.31 ± 0.12).

Executive Functions

Inhibition

The MANCOVA (controlling for gender) conducted on the three inhibition tasks revealed significant main effects of group (Wilks' lambda = .466; $F(3,146) = 57.7$, $p < .0001$) and age (Wilks' lambda = .738; $F(6,292) = 8$, $p = .03$) as well as a significant age \times group interaction effect (Wilks' lambda = .91; $F(6,292) = 2.35$, $p < .0001$). The results of the univariate ANOVAs for each task are reported below.

For the GNG task (Figure 1), the ANOVA revealed a significant main effect of group, $F(1,154) = 106.86$, $p < .001$, $\eta^2_p = .41$, showing that MID participants (2.71 ± 0.96) had a lower d' score than TD participants (3.90 ± 0.70). The ANOVA also revealed a significant main effect of age, $F(2,154) = 19.32$, $p < .001$, $\eta^2_p = .20$. Post-hoc analyses revealed that all the age groups differed from each other, with d' increasing with age (10-12 years vs. 13-16 years, $p < .05$; 10-12 years vs. 17-20 years, $p < .001$; 13-16 years vs. 17-20 years, $p < .05$). Finally, the group \times age interaction effect was also significant, $F(2,154) = 5.62$, $p < .05$, $\eta^2_p = .068$. In both MID and TD groups, the main effect of age was significant ($F(2,76) = 14.46$, $p < .001$, $\eta^2_p = .28$, and $F(2,78) = 8.53$, $p < .001$, $\eta^2_p = .18$, respectively). In the MID group, the 10-12 years old had a lower inhibition sensitivity score than both the 13-16 ($p < .001$) and the 17-20 years old ($p < .001$). In the TD group, the 17-20 years old had a higher inhibition sensitivity score than both the 13-16 ($p < .05$) and the 10-12 years old ($p < .05$). Furthermore, the main effect of the group was significant in each of the three age groups, showing that MID participants systematically

obtained a lower d' score compared to TD participants (10-12 years old: $F(1,50) = 57.48$, $p < .001$, $\eta^2_p = .54$; 13-16 years old: $F(1,52) = 13.57$, $p < .001$, $\eta^2_p = .21$; and 17-20 years old: $F(1,52) = 42.13$, $p < .001$).

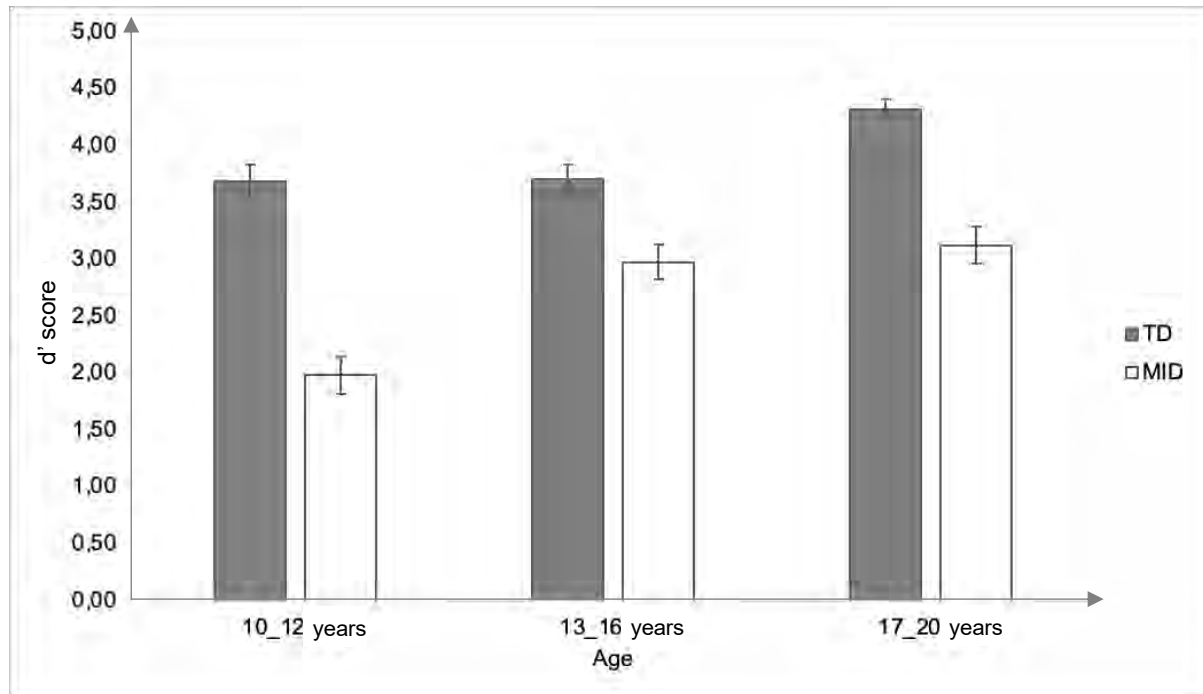


Figure 1

Mean inhibition sensitivity score (d') in the Go No-Go task as a function of Group and Age. Bars represent standard errors. TD = Typically Developing; MID = Mild Intellectual Disability.

For the MIT (Figure 2), the ANCOVA (controlling for gender) revealed only a significant main effect of group, $F(1,153) = 43.68$. $p < .001$, $\eta^2_p = .22$, showing that MID participants had a higher interference score ($797 \text{ ms} \pm 277$) than TD participants ($554 \text{ ms} \pm 143$). The main effect of age and a group \times age interaction effect were insignificant (both $ps > .05$).

For the RAST (Figure 3), the ANOVA also revealed only a significant main effect of group, $F(1,154) = 10.49$. $p < .001$. $\eta^2_p = .064$. MID participants obtained a higher interference score ($90 \text{ ms} \pm 81$) than TD participants ($54 \text{ ms} \pm 58$). The main effect of age ($p > .05$) and the interaction effect between group and age were significant ($p > .05$).

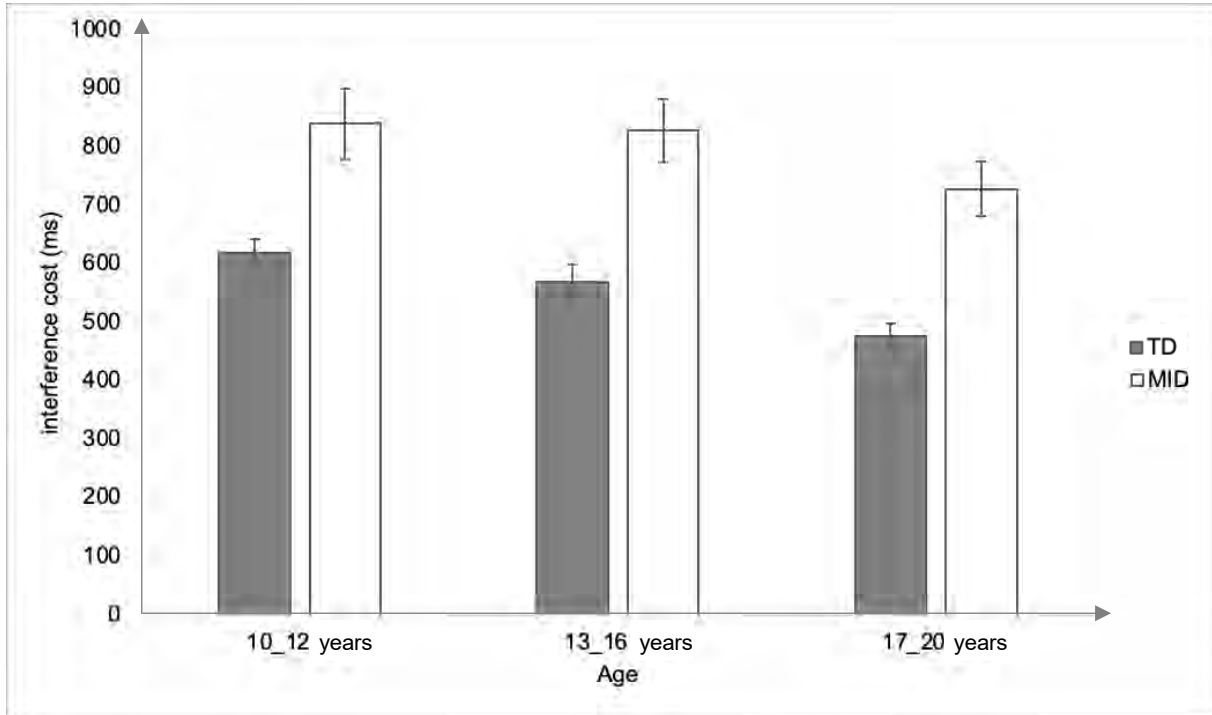


Figure 2

Mean interference cost (in ms) in the Multisource Interference Task as a function of Group and Age. Bars represent standard errors. TD = Typically Developing; MID = Mild Intellectual Disability.

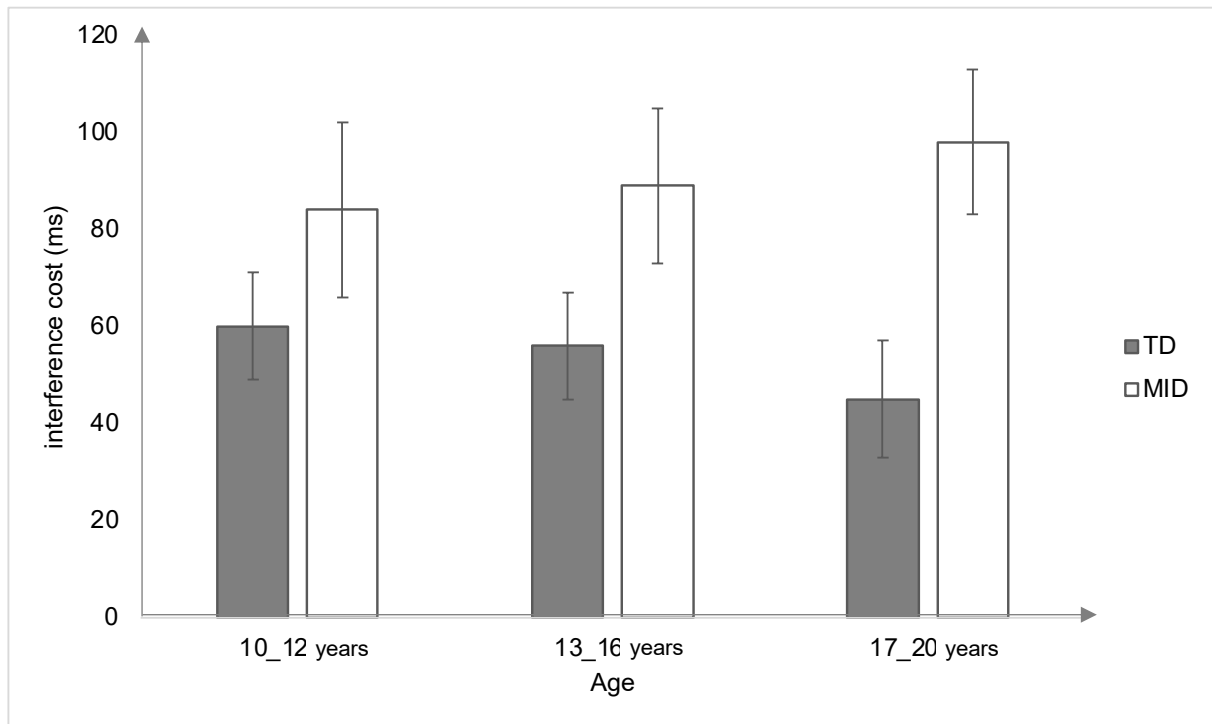


Figure 3

Mean interference cost (in ms) in the Real Animal Size Task as a function of Group and Age. Bars represent standard errors. TD = Typically Developing; MID = Mild Intellectual Disability.

Shifting

The MANOVA conducted on the three shifting tasks revealed a significant main effect of group (Wilks' lambda = .793; $F(3,152) = 13.2$, $p < .0001$). The results of the univariate ANOVAs for each task are reported below.

For the WCST (Figure 4), the main effect of the group was significant, $F(1,154) = 28.10$, $p < .001$, $\eta^2_p = .15$, revealing that MID participants made more perseverative errors (2.90 ± 0.34) than TD participants (1.09 ± 1.16). The group \times age interaction effect was also significant, $F(2,154) = 5.18$, $p < .01$, $\eta^2_p = .063$. The main effect of age in MID participants was significant, $F(2,76) = 3.58$, $p < .05$, $\eta^2_p = .086$. More precisely, the 10-12 years old group made significantly more perseverative errors than the 17-20 years old group ($p < .05$). By contrast, the main effect of age in TD participants was insignificant, $F(2,78) = 1.82$, $p > .05$. Furthermore, MID participants made more perseverative errors than TD participants in the 10-12 years old group, $F(1,50) = 19.14$, $p < .001$, $\eta^2_p = .028$, and the 13-16 years old group, $F(1,52) = 5.62$, $p < .05$, $\eta^2_p = .098$, but not in the 17-20 years old group, $F(1,52) = 3.39$, $p > .05$.

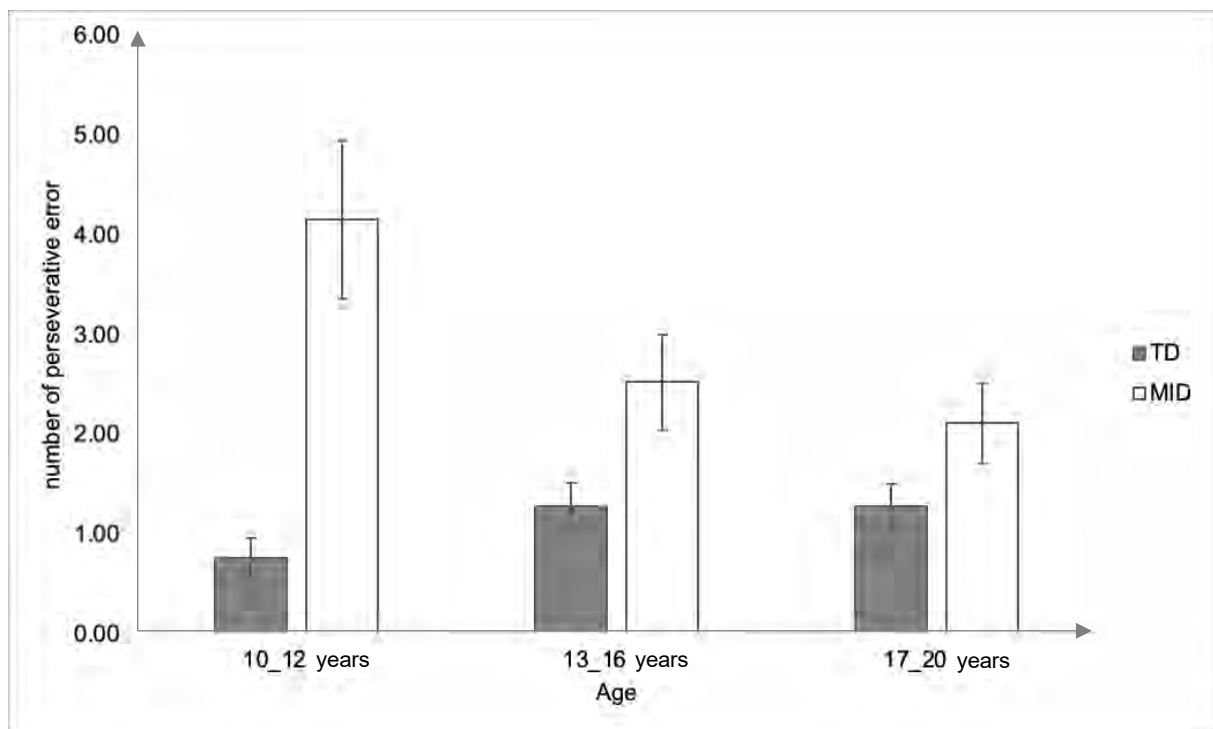


Figure 4

Mean number of perseverative errors in the Wisconsin Card Sorting Task as a function of Group and Age. Bars represent standard errors. TD = Typically Developing; MID = Mild Intellectual Disability.

For the ARTS (Figure 5), the ANOVA did not reveal any significant main or interaction effect (all $ps > .1$).

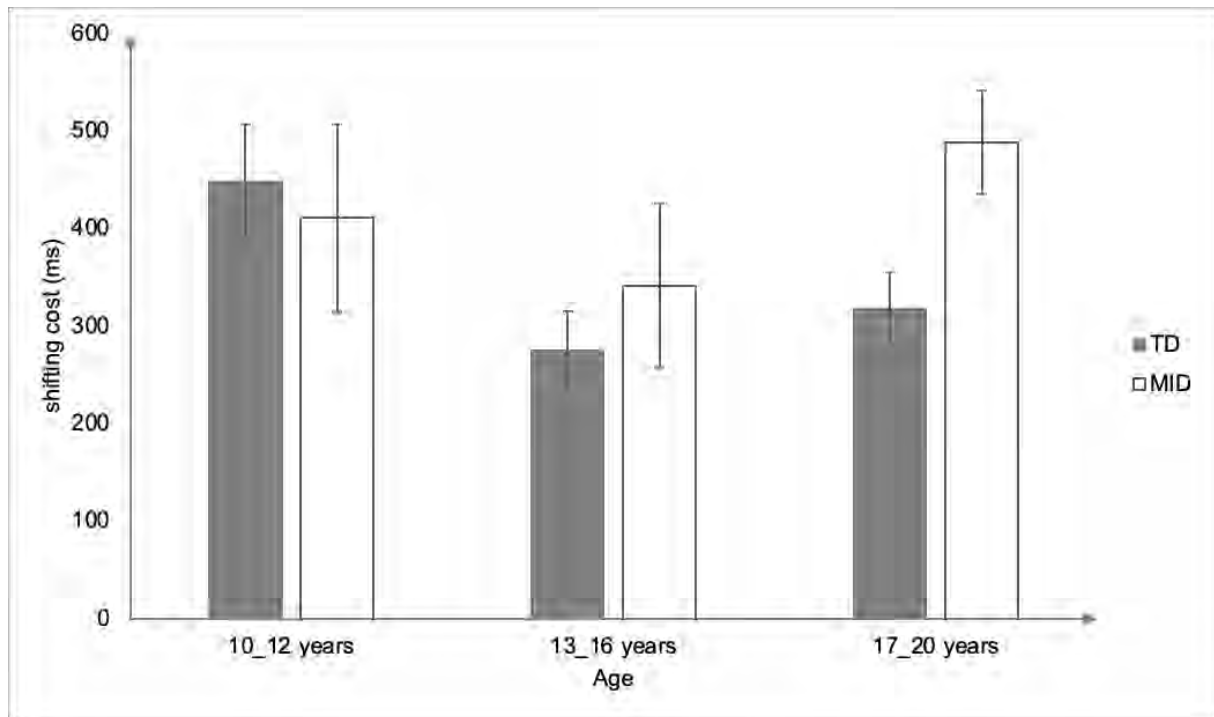


Figure 5
Mean shifting cost (in ms) in the Alternating Running Task Switch as a function of Group and Age. Bars represent standard errors. TD = Typically Developing; MID = Mild Intellectual Disability.

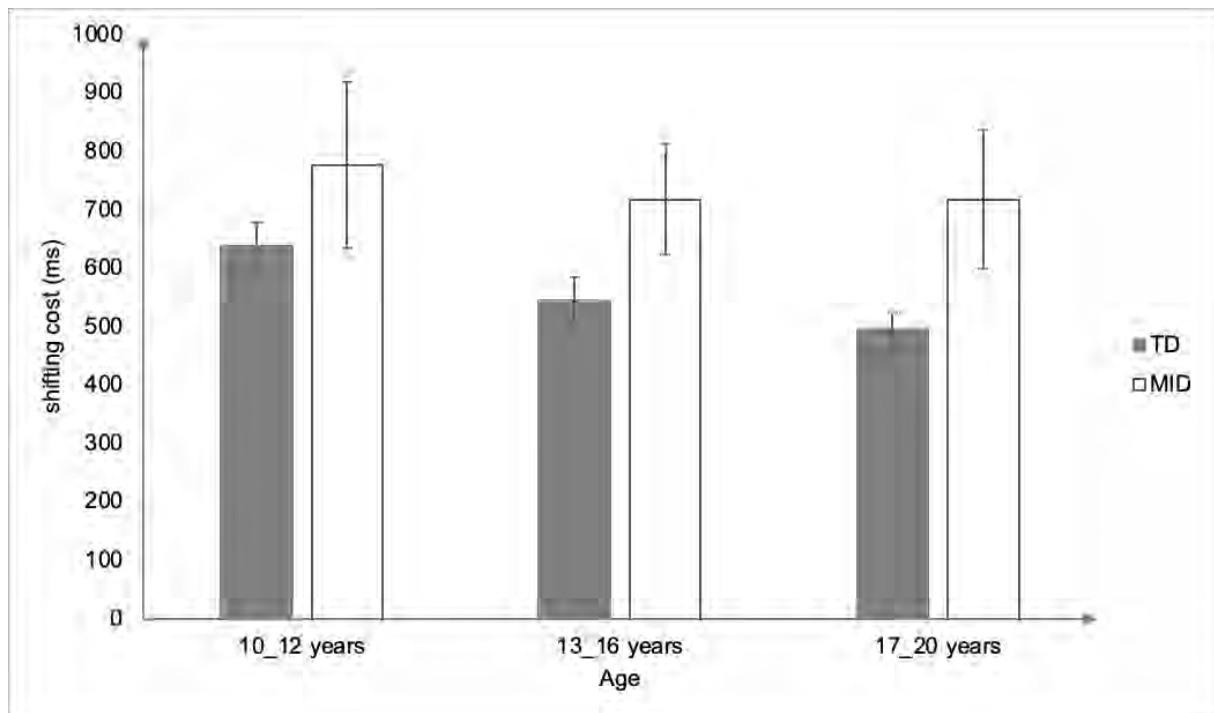


Figure 6
Mean shifting cost (in ms) in the Cued Task Switching as a function of Group and Age. Bars represent standard errors. TD = Typically Developing; MID = Mild Intellectual Disability.

Regarding the CTS (Figure 6), the ANOVA revealed a significant main effect of group, $F(1,154) = 6.23$. $p < .05$, $\eta^2_p = .04$, indicating that MID participants had a higher shifting cost (736 ms \pm 604) than TD participants (560 ms \pm 195). No other effect was significant (all F s $<$ 1).

Information processing speed

The results of the ANCOVA (controlling for gender) revealed a significant main effect of group, $F(1,153) = 48.63$. $p < .001$, $\eta^2_p = .24$, showing that MID participants had longer reaction time (478 ms \pm 145) than TD participants (375 ms \pm 61) (Figure 7). The ANCOVA also revealed a significant main effect of age, $F(2,153) = 21.26$. $p < .001$, $\eta^2_p = .22$. Post-hoc analyses showed that the 17-20-year-old group had significantly shorter reaction time compared to both the 13-16 ($p < .05$) and the 10-12 ($p < .001$) years old groups. These two latter groups also significantly differed from each other ($p < .05$). Finally, the group \times age interaction effect was not significant ($F < 1$).

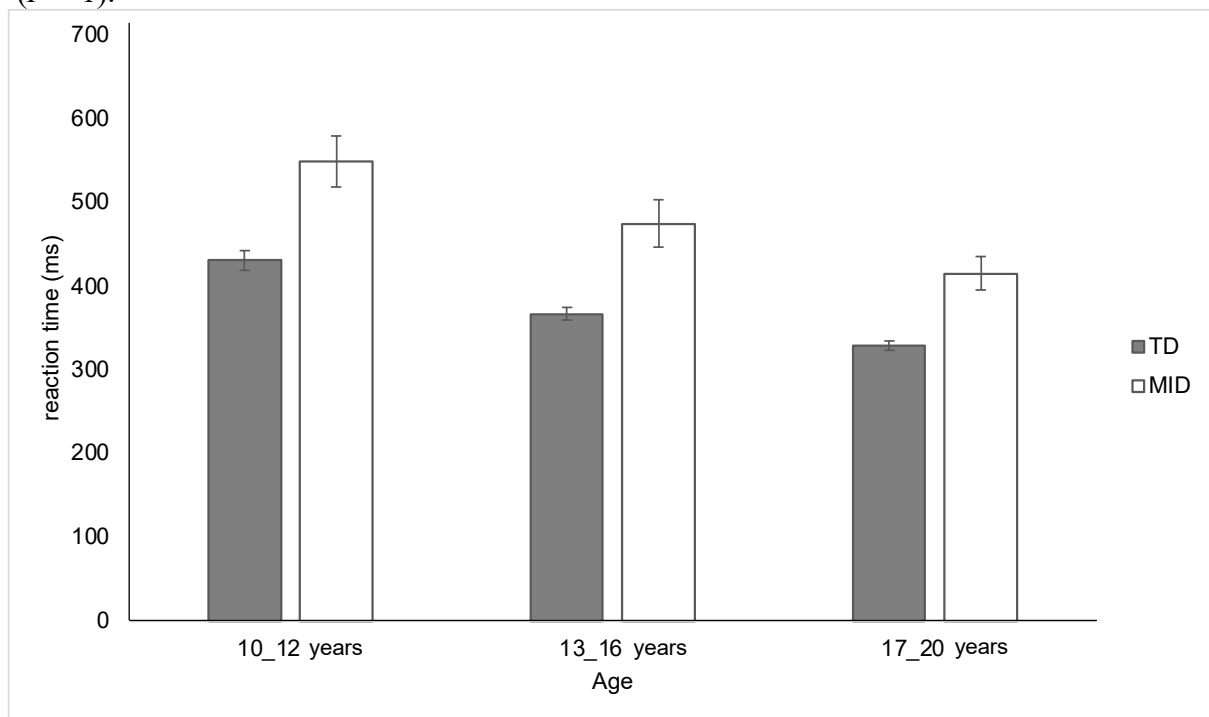


Figure 7

Mean reaction time (in ms) in the Choice Reaction Time task as a function of Group and Age. Bars represent standard errors. TD = Typically Developing; MID = Mild Intellectual Disability.

Relationship Between Duration Estimation and Cognitive Performances

The results of bivariate partial correlations (controlling for gender) showed that the performance on the GNG task significantly and negatively correlated with both the accuracy score ($r = -.37, p < .001$) and the variability score ($r = -.50, p < .001$) of the time-duration reproduction task (Table 2). Reaction time in the CRT task positively correlated with both the accuracy score ($r = .56, p < .001$) and the variability score ($r = .39, p < .001$). The performance on the MIT positively correlated only with the variability score ($r = .27, p < .001$). Finally, the number of perseverative errors in the WCST also positively correlated with the variability score ($r = .26, p < .001$). These findings indicate that participants with better inhibition performance in the GNG task and faster information processing speed reproduced durations more accurately and with less variability. Participants with better inhibition performance in the MIT and with better cognitive shifting performance in the WCST also reproduced durations with less variability.

Table 2

Partial correlations (controlling for Gender) between the performances of cognitive and duration reproduction tasks.
 ** $p < .01$, *** $p < .001$

Variables	Accuracy score	Variability score
GNG	$r = -.34$ ***	$r = -.46$ ***
MIT	$r = .083$	$r = -.21$ **
RAST	$r = -.087$	$r = -.14$
WCST	$r = .075$	$r = .26$ ***
ARTS	$r = -.069$	$r = .06$
CTS	$r = -.005$	$r = .14$
CRT	$r = .49$ ***	$r = .39$ ***

*GNG: Go no-Go ; MIT: Multisource Interference Task ; RAST: Real Size Animal Task ; WCST: Wisconsin Card Sorting Test ;
 ARTS: Alternating Run Task Switching ; CTS: Cued Task Switching ; CRT: Choice Reaction Time*

Subsequently, we performed a series of multiple linear regression analyses to examine the extent to which performance on these cognitive tasks accounted for the variance observed in the accuracy and variability scores of the time-duration reproduction task as a function of group and age. First, we ran a multiple linear regression analysis with the accuracy score of the reproduction task as the dependent variable and with group and age as fixed factors, d' score of the GNG task and reaction time of the CRT task as predictors, and gender as a covariate. The model was significant ($F(5,154) = 15.1, p < .001$) and accounted for 33% of the total variance

($R^2 = .33$). The follow-up analysis showed that the variables group and age were insignificant (both $ps > .05$) and that only reaction time in the CRT task ($\beta = 2.03, p < .001$) but not d' in the GNG task ($p > .1$) was a significant predictor. In other words, variations in information processing speed explained most of the variance in the accuracy score of the duration reproduction task due to the presence or absence of MID and increased age.

Second, we ran a multiple linear regression analysis with the variability score of the duration reproduction task as the dependent variable and with Group and Age as fixed factors, d' score of the GNG task, reaction time of the CRT task, the interference cost of the MIT and the number of perseverative errors of the WCST as predictors, and with Gender as a covariate. The model was significant ($F(7,152) = 13.1, p < .001$) and accounted for 38% of the total variance ($R^2 = .38$). The follow-up analysis indicated that the group and age were no longer significant (both $ps > .05$), and that only d' in the GNG task ($\beta = -0.06, p < .001$) was a significant predictor. The three other predictors were not significant (all $ps > .05$). In other words, variations in inhibition performance explained most of the variance in the variability score of the duration reproduction task due to the presence or absence of MID and increased age.

Discussion

This study compared children and adolescents with idiopathic MID with TD individuals in the development of inhibition, shifting, and information processing speed abilities and explored the association between these variables and the participants' time-duration reproduction abilities. Our findings highlighted that individuals with MID had lower inhibition, shifting, and information processing speed performances than TD individuals in all tasks except one task evaluating shifting (ARTS). Furthermore, MID participants' performance improved with age across the three tasks, inhibition (GNG task), shifting (WCST), and information processing speed (CRT task), while in TD participants (GNG and CRT), it improved in only two of them. Moreover, multiple linear regression analyses revealed that information processing speed measured by the CRT task explained most of the differences in accuracy performance during the duration reproduction task due to MID and age and that inhibition abilities measured by the GNG task explained most of the differences in variability performance during the duration reproduction task due to MID and age. To better understand these results, we focused respectively on the development of the link between duration reproduction and inhibition, shifting, and information processing speed in MID before discussing some important theoretical and methodological limitations of our study.

Regardless of age, children and adolescents with MID demonstrated lower inhibition performances than their chronological age-matched peers in all three tasks. This result is consistent with previous studies showing an inhibition deficit in MID individuals aged between 4 and 23 years (e.g., Gligorović & Buha Đurović, 2014; Grada & Simoni, 2018; Zagaria et al., 2021). Importantly, even at the age of 17 to 20 years, MID individuals in our study showed lower inhibition performance in the three inhibition tasks than TD individuals aged 10 to 12 years. Inhibition performance also improved with age in both MID and TD individuals but only for the GNG task, although the developmental trajectory differed in the two groups. More precisely, in MID individuals, inhibition performance increased from 10-12 years to 13-16 years and then stagnated, while in TD individuals, it staged from 10-12 years to 13-16 years and then increased from 13-16 years to 17-20 years. Overall, MID individuals improved earlier than TD individuals, but their level of performance remained low, and even at age 17-20, they did not catch up with TDs aged 10-12. The inhibition skills of MID adults over 20 years old should be examined to determine whether they are fully developed or still evolving. The developmental curve observed in our groups of TD individuals is consistent with the literature, which suggests a sharp increase in inhibition in preschool age, then a slower increase through adolescence, and complete maturation around age 17 (Best & Miller, 2010; Chevalier, 2010; Fournieret & des Portes, 2017). However, this age effect was found only for the GNG task and not the MIT or RAST, which might suggest that our three tasks require different inhibition resources. We will return to this point in detail in a later section.

Our results also highlighted that inhibition, as measured by the GNG task, was a significant predictor of duration reproduction performance variability. This means that inhibition performance evaluated by this task explained most of the deficit in variability performance during the reproduction task due to MID and age. Although a previous study has already supported a link between inhibition and duration reproduction performance in TD children and adolescents (Rattat & Chevalier, 2020), the present study is the first to demonstrate this association in MID individuals. How can we explain this link between the variability in duration reproductions and inhibition abilities? In the duration reproduction task, the participants had to accumulate temporal information and then monitor and maintain two durations (the target duration and the reproduced duration) in memory. Therefore, in the context of the internal clock model, inhibition deficits may affect switch functioning and retention of the duration in working memory by ineffectively filtering out irrelevant stimuli. This inefficiency may include inconstant responses (high variability), i.e., difficulties in correctly

reproducing the target duration in a time-consistent manner. Indeed, our results highlighted that MID participants exhibit greater variability in duration reproduction performance than TD participants, which was explained by their lower inhibition performance in the GNG task.

Our findings also showed a deficit in the shifting process in individuals with MID in two out of the three tasks used. More precisely, MID participants showed lower shifting performance in the WCST and the CTS than TD participants, while the two groups did not differ significantly in the ARTS. Globally, our results favor a deficit in shifting abilities in this population. These results add to the current but limited and controversial literature on the effect of MID on shifting abilities, with some studies showing deficits (e.g., Danielsson et al., 2012; Gligorović & Buha, 2013) while one recent study showing somewhat preserved abilities (Kitamura et al., 2022). Shifting performance in MID might be task-dependent, as our results suggest, or may be linked to differences in other cognitive processes involved in the tasks we employed in the current study. Further studies are needed to clarify these points.

From a developmental perspective, shifting abilities improved with age, as measured by the WCST in the MID group; specifically, 17-20-year-old participants performed better than 10-12-year-old participants. This is the first study to highlight this age-related improvement in shifting abilities in MID, although it pertained to only one out of the three tasks used. In the existing literature on typical development, some studies have demonstrated that shifting abilities appear around the age of 3, and progress slowly throughout adolescence (for a review, see Fournier & des Portes, 2017). Therefore, we should have observed age-related differences, at least between the youngest and oldest participants in our TD sample, but this was not the case. Methodological reasons discussed later could partly explain these results.

Regarding the involvement of shifting abilities in duration reproduction ability, our results showed, in the first step, that WCST performance significantly correlated with the variability score of the duration reproduction task. This is consistent with previous reports (e.g., Ogden et al., 2014). However, when entered with other measures of cognitive performance in a multiple linear regression analysis, WCST performance was not a significant predictor of on duration reproduction performance variability, regardless of age or MID. The only significant predictor in this analysis was the inhibition measure of the GNG task, as discussed above. This is important because, having measured several cognitive functions using various tasks, our study allowed us to delineate that, above shifting abilities, inhibition abilities emerged as the most powerful and only significant predictor of the differences in duration reproduction variability

due to both age and MID. Such a conclusion could not be reached by previous studies, which assessed only one cognitive function at a time.

Finally, our findings revealed a slower information processing speed, as measured by the CRT, in individuals with MID than in TD individuals. This result is consistent with previous studies showing a slower information processing speed in individuals with low IQ (e.g., Loranger et al., 2000) and with ID (e.g., Kail, 1992). Information processing speed performance also improved with age in both TD and MID participants. Indeed, 17 to 20-year-old adolescents had a faster information processing speed than those aged 13 to 16, who in turn showed a faster information processing speed than the younger group aged 10 to 12. These results are also largely consistent with the literature on typical development, which reports an increase in information processing speed between the ages of 9 and 12 and even up to the age of 15 when performance is similar to that of adults (e.g., Williams et al., 2014). However, in our study, adolescents further improved their information processing speed after age 15 since 17 to 20-year-old participants were the fastest. In line with previous studies (e.g., Droit-Volet & Zélanti, 2013; Fink & Neubauer, 2005; Perbal et al., 2002; Rammsayer & Brandler, 2007), we also highlighted a correlation between information processing speed, as measured by the CRT and both the variability and accuracy scores in the duration reproduction task.

Furthermore, when information processing speed was controlled, the group and age effects previously observed on the accuracy score (but not on the variability score) in the reproduction task disappeared. This means that information processing speed largely explained the accuracy deficit in the reproduction task due to MID and age. One potential explanation for this can be found in the neurophysiological literature. In 1961, Survilho showed that the speed of information processing increases with the speed of the alpha rhythm of neural oscillations. As this frequency increases with age, it might reflect the age-related increase in neural oscillatory activities that support time representation, suggesting that temporal precision is directly linked with information processing speed (Droit-Volet & Zélanti, 2013). Consequently, faster information processing speed directly predicted better precision in duration reproduction and thus explained better accuracy performance of older and TD individuals compared to MID individuals.

To sum up, our results suggest that MID participants' lower inhibition skills can explain the greater variability in duration reproductions, while their slower information processing speed explained mainly the decreased accuracy of their temporal reproductions. However, these

interpretations need to be discussed in light of some limitations or unresolved questions of the present study. As outlined in the Introduction section, one of our main aims was to examine the influence of inhibition and shifting abilities at the level of cognitive construct and not at the level of experimental tasks to overcome the problem of task impurity (Miyake et al., 2000; Rabbit, 1997). However, we were unable to find the expected common structure for both inhibition and shifting measures. Consequently, we had to conduct our analyses task by task, instead of using the factorial approach of executive functions. Indeed, the question of the unicity or diversity of executive functions is still debated in the literature. The most prominent model considers the existence of a common executive factor in the preschool period, which is categorized into three distinct factors (inhibition, cognitive flexibility, and updating working memory) from the age of 6 or later (Best & Miller, 2010; Diamond, 2013; Friedman et al., 2008; Lee et al., 2013; Miyake et al., 2000). More recently, some authors found different effects across populations, depending on the executive task used to measure a target executive function, and they did not find a common factorial structure for each executive function (Holmén et al., 2024; Rosales et al., 2023). These findings support the revision of Miyake's model and, more generally, question the assessment of executive functions using factorial models.

Second, as we analyzed our results task by task, we found heterogeneous findings; the results concerning some tasks confirmed our expectations, while others did not. These heterogeneous findings are not always easy to interpret. For the inhibition tasks, we can assume that the GNG task requires more motor skills than the other two inhibition tasks and is similar to the motor skills required in the duration reproduction task. As Droit-Volet (2010) demonstrated, this involvement of motor components may explain why the performance in this GNG task was related only to the performance in the duration reproduction task. Another possible explanation could be a ceiling effect in the MIT and RAST. Indeed, even if we did not report the proportion of correct responses in these two tasks, they were very high, reaching the maximum for many individuals, including MID children and adolescents. For the shifting tasks used in our study, the different results between our three tasks can be due to the mobilization of cognitive processes other than shifting. For example, many studies have shown that the WCST requires other cognitive abilities, such as abstraction, working memory, inhibition, or planning (for a review, see Miles et al., 2021). Here, we can also postulate a ceiling effect on the CTS and the ARTS, as the proportion of correct responses to these tasks was also very high. Clearly, more work is still needed to disentangle these speculations.

Conclusion

To conclude, we highlighted deficits in inhibition, shifting, and information processing speed abilities in MID children and adolescents and showed that their lower inhibition skills mainly explain the greater variability of their duration reproductions. In contrast, their slower information processing speed mainly explains the lower accuracy of their temporal reproductions. These findings complement those of our previous study, showing that working memory updating abilities also explain part of temporal deficits in the same reproduction task (Gourlat et al., 2023). We can, therefore, now explore the hierarchy of the involvement of these different cognitive components in the duration estimation deficits in MID individuals and their developmental trajectory. A limitation of the present study is that it relied only on a subset of the tasks used because the latent construct approach of executive functions could not be applied in this study. Further studies should also include adults older than 20 years to determine whether the cognitive difficulties observed in MID children and adolescents persist to adulthood (suggesting a deficit) or overcome later (suggesting a developmental delay).

Acknowledgments

This research was part of the Ph.D. thesis of the first author, which was funded by the Occitanie region and the Institut National Universitaire Champollion, University of Toulouse [grant number 2000 73 20]. The authors thank the association AgaPei, all the members of the medico-educational healthcare establishments and all the educational staff of the schools in Occitanie for their active participation in the present study. We would also like to thank Benoît Valéry for his help in implementing the computerized cognitive tasks, Leïla Margouti and Amandine Lapabe for participants' recruitment and data collection. Finally, thank you to each (anonymous) individual who completed the study.

Declaration of conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- Albinet, C. T., Boucard, G., Bouquet, C. A., & Audiffren, M. (2012). Processing speed and executive functions in cognitive aging: How to disentangle their mutual relationship? *Brain and Cognition, 79*(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2012.02.001>
- APA. (2013). Diagnostic and statistical manual of mental disorders: DSM-5TM, 5th ed (p. xlv, 947). American Psychiatric Publishing, Inc.
<https://doi.org/10.1176/appi.books.9780890425596>
- Barkley, R. A., Murphy, K. R., & Bush, T. (2001). Time perception and reproduction in young adults with attention deficit hyperactivity disorder. *Neuropsychology, 15*(3), 351-360.
<https://doi.org/10.1037//0894-4105.15.3.351>
- Baudouin, A., Vanneste, S., Pouthas, V., & Isingrini, M. (2006). Age-related changes in duration reproduction: Involvement of working memory processes. *Brain and cognition, 62*, 17-23. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2006.03.003>
- Bennett-Gates, D., & Zigler, E. (1998). Resolving the developmental-difference debate: An evaluation of the triarchic and systems theory models. In *Handbook of mental retardation and development* (p. 115-131). Cambridge University Press.
- Best, J. R., & Miller, P. H. (2010). A Developmental Perspective on Executive Function: Development of Executive Functions. *Child Development, 81*(6), 1641-1660.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2010.01499.x>
- Bexkens, A., Van der Molen, M. W., Collot d'Escury-Koenigs, A. M. L., & Huizenga, H. M. (2014). Interference control in adolescents with mild-to-borderline intellectual disabilities and/or behavior disorders. *Child Neuropsychology: A Journal on Normal and Abnormal Development in Childhood and Adolescence, 20*(4), 398-414.
<https://doi.org/10.1080/09297049.2013.799643>
- Block, R. A., Hancock, P. A., & Zakay, D. (2010). How cognitive load affects duration judgments A meta-analytic review. *Acta Psychologica, 134*(3), 330-343.
<https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2010.03.006>
- Block, R. A., & Zakay, D. (1997). Prospective and retrospective duration judgments: A meta-analytic review. *Psychonomic Bulletin & Review, 4*(2), 184-197.
<https://doi.org/10.3758/BF03209393>
- Block, R. A., & Zakay, D. (2006). Prospective Remembering Involves Time Estimation and Memory Processes. In *Timing the future: The case for a time-based prospective memory* (p. 25-49). World Scientific Publishing Co.

https://doi.org/10.1142/9789812707123_0002

- Brown, S. W. (2006). Timing and executive function: Bidirectional interference between concurrent temporal production and randomization tasks. *Memory & Cognition*, *34*(7), 1464-1471. <https://doi.org/10.3758/BF03195911>
- Brown, S. W., Collier, S. A., & Night, J. C. (2013). Timing and executive resources: Dual-task interference patterns between temporal production and shifting, updating, and inhibition tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *39*(4), 947-963. <https://doi.org/10.1037/a0030484>
- Brown, S. W., & Friehe, C. T. (2000). Information processing in the central executive: Effects of concurrent temporal production and memory updating tasks. In *Rhythm perception and production*, (P. Desain, L. Windsor (Eds.), p. 193-196). Swets & Zeitlinger.
- Bush, G., & Shin, L. M. (2006). The Multi-Source Interference Task: An fMRI task that reliably activates the cingulo-frontal-parietal cognitive/attention network. *Nature Protocols*, *1*(1), 308-313. <https://doi.org/10.1038/nprot.2006.48>
- Chevalier, N. (2010). Les fonctions exécutives chez l'enfant : Concepts et développement. *Canadian Psychology/Psychologie canadienne*, *51*(3), 149-163. <https://doi.org/10.1037/a0020031>
- Chevalier, N., Dauvier, B., & Blaye, A. (2018). From prioritizing objects to prioritizing cues: A developmental shift for cognitive control. *Developmental Science*, *21*(2), e12534. <https://doi.org/10.1111/desc.12534>
- Chevalier, N., Kelsey, K. M., Wiebe, S. A., & Espy, K. A. (2014). The Temporal Dynamic of Response Inhibition in Early Childhood: An ERP Study of Partial and Successful Inhibition. *Developmental Neuropsychology*, *39*(8), 585-599. <https://doi.org/10.1080/87565641.2014.973497>
- Cianchetti, C., Corona, S., Foscoliano, M., Contu, D., & Sannio-Fancello, G. (2007). Modified Wisconsin Card Sorting Test (MCST, MWCST): Normative Data in Children 4–13 Years Old, According to Classical and New Types of Scoring. *The Clinical neuropsychologist*, *21*, 456-478. <https://doi.org/10.1080/13854040600629766>
- Danielsson, H., Henry, L., Messer, D., & Rönnerberg, J. (2012). Strengths and weaknesses in executive functioning in children with intellectual disability. *Research in Developmental Disabilities*, *33*(2), 600-607. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.11.004>
- Delis, D. C., Kaplan, E., & Kramer, J. H. (2001). *Delis-Kaplan Executive Function System (D-KEFS)* [APA PsycTests.; Database record]. <https://doi.org/10.1037/t15082-000>

- Diamond, A. (2013). Executive Functions. *Annual review of psychology*, 64, 135-168.
<https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>
- Droit-Volet, S. (2010). Stop using time reproduction tasks in a comparative perspective without further analyses of the role of the motor response: The example of children. *European Journal of Cognitive Psychology*, 22(1), 130-148.
<https://doi.org/10.1080/09541440902738900>
- Droit-Volet, S., & Zélanti, P. S. (2013). Development of Time Sensitivity and Information Processing Speed. *PloS one*, 8(8), e71424.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071424>
- Erostarbe-Pérez, M., Reparaz-Abaitua, C., Martínez-Pérez, L., & Magallón-Recalde, S. (2022). Executive functions and their relationship with intellectual capacity and age in schoolchildren with intellectual disability. *Journal of Intellectual Disability Research*, 66(1-2), 50-67. <https://doi.org/10.1111/jir.12885>
- Fagot, B. I., & Gauvain, M. (1997). Mother-child problem solving: Continuity through the early childhood years. *Developmental Psychology*, 33(3), 480-488.
<https://doi.org/10.1037//0012-1649.33.3.480>
- Fink, A., & Neubauer, A. C. (2005). Individual differences in time estimation related to cognitive ability, speed of information processing and working memory. *Intelligence*, 33(1), 5-26. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2004.09.001>
- Fortin, C., Schweickert, R., Gaudreault, R., & Viau-Quesnel, C. (2010). Timing is affected by demands in memory search but not by task switching. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 36(3), 580-595.
<https://doi.org/10.1037/a0017639>
- Fourneret, P., & des Portes, V. (2017). Approche développementale des fonctions exécutives : Du bébé à l'adolescence. *Archives de Pédiatrie*, 24(1), 66-72.
<https://doi.org/10.1016/j.arcped.2016.10.003>
- Friedman, N. P., Miyake, A., Corley, R. P., Young, S. E., DeFries, J. C., & Hewitt, J. K. (2006). Not All Executive Functions Are Related to Intelligence. *Psychological Science*, 17(2), 9. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01681.x>
- Friedman, N. P., Miyake, A., Young, S. E., DeFries, J. C., Corley, R. P., & Hewitt, J. K. (2008). Individual differences in executive functions are almost entirely genetic in origin. *Journal of Experimental Psychology: General*, 137(2), 201-225.
<https://doi.org/10.1037/0096-3445.137.2.201>
- Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Knight, C., & Stegmann, Z. (2004). Working Memory Skills

- and Educational Attainment: Evidence from National Curriculum Assessments at 7 and 14 Years of Age. *Applied Cognitive Psychology*, 18, 1-16.
<https://doi.org/10.1002/acp.934>
- Gautier, T., & Droit-Volet, S. (2002). Attention and time estimation in 5- and 8-year-old children: A dual task procedure. *Behavioural Processes*, 58(1-2), 57-66.
[https://doi.org/10.1016/S0376-6357\(02\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0376-6357(02)00002-5)
- Gibbon, J., Church, R. M., & Meck, W. H. (1984). Scalar Timing in Memory. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 423(1), 52-77. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1984.tb23417.x>
- Gilbert, S. J., & Burgess, P. W. (2008). Executive function. *Current Biology*, 18(3), R110-114.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.12.014>
- Gligorović, M., & Buha Đurović, N. (2014). Inhibitory control and adaptive behaviour in children with mild intellectual disability. *Journal of Intellectual Disability Research: JIDR*, 58(3), 233-242. <https://doi.org/10.1111/jir.12000>
- Gligorović, M., & Buha, N. (2013). Conceptual abilities of children with mild intellectual disability: Analysis of Wisconsin Card Sorting Test performance. *Journal of Intellectual & Developmental Disability*, 38(2), 134-140.
<https://doi.org/10.3109/13668250.2013.772956>
- Gourlat, E., Rattat, A.-C., & Albinet, C. T. (2024). Vers une meilleure compréhension du trouble du développement intellectuel léger idiopathique : Des symptômes aux modalités d'accompagnement. *Psychologie Française*.
- Gourlat, E., Rattat, A.-C., Valéry, B., & Albinet, C. (2023). Deficits of Duration Estimation in Individuals aged 10 to 20 Years Old with Idiopathic Mild Intellectual Disability: The Role of Updating Working Memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*.
- Grada, C., & Simoni, E. (2018). Inhibitory control of attention difference versus developmental theory findings in mild intellectual disability and ADHD. *Journal of Childhood & Developmental Disorders*, 04, 13-14. <https://doi.org/10.4172/2472-1786.100076>
- Hallez, Q. (2020). Développement, temps et attention : Comportements et modélisation. *Bulletin de psychologie, Numéro 566(2)*, 133-136.
<https://doi.org/10.3917/bupsy.566.0133>
- Hallez, Q., Damsma, A., Rhodes, D., van Rijn, H., & Droit-Volet, S. (2019). The dynamic effect of context on interval timing in children and adults. *Acta Psychologica*, 192, 87-93.
<https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2018.10.004>
- Hallez, Q., & Droit-Volet, S. (2017). High levels of time contraction in young children in dual

- tasks are related to their limited attention capacities. *Journal of Experimental Child Psychology*, 161, 148-160. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2017.04.013>
- Holmén, J., Chaplin, W., & Del Vecchio, T. (2024). Measures of executive function may not be indicators of latent constructs. *Journal of Neuropsychology*. <https://doi.org/10.1111/jnp.12363>
- Inserm. (2016). *Déficiences intellectuelles*. Inserm - La science pour la santé. <https://www.inserm.fr/information-en-sante/expertises-collectives/deficiences-intellectuelles>
- Kail, R. (1991). Processing time declines exponentially during childhood and adolescence. *Developmental Psychology*, 27(2), 259-266. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.27.2.259>
- Kail, R. (1992). General slowing of information-processing by persons with mental retardation. *American Journal on Mental Retardation*, 97(3), 333-341.
- Kail, R., & Salthouse, T. A. (1994). Processing speed as a mental capacity. *Acta Psychologica*, 86(2-3), 199-225. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(94\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0001-6918(94)90003-5)
- Karayanidis, F., Jamadar, S., & Sanday, D. (2013). Stimulus-level interference disrupts repetition benefit during task switching in middle childhood. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 841. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00841>
- Kitamura, Y., Okumura, Y., Shirakawa, Y., Ikeda, Y., & Kita, Y. (2022). Characteristics of shifting ability in children with mild intellectual disabilities: An experimental study with a task-switching paradigm. *Journal of Intellectual Disability Research*. 66(11), 853-864. <https://doi.org/10.1111/jir.12974>
- Lee, K., Bull, R., & Ho, R. M. H. (2013). Developmental changes in executive functioning. *Child Development*, 84(6), 1933-1953. <https://doi.org/10.1111/cdev.12096>
- Loranger, Pepin M., Doyon M., & Blais, M.-C. (2000). Mesures de vitesse des opérations mentales chez des enfants présentant une déficience intellectuelle. *Revue francophone de la déficience intellectuelle*, Vol. 11 n° 2, 117-128.
- Maulik, P. K., Mascarenhas, M. N., Mathers, C. D., Dua, T., & Saxena, S. (2011). Prevalence of intellectual disability: A meta-analysis of population-based studies. *Research in Developmental Disabilities*, 32(2), 419-436. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2010.12.018>
- Miles, S., Howlett, C. A., Berryman, C., Nedeljkovic, M., Moseley, G. L., & Phillipou, A. (2021). Considerations for using the Wisconsin Card Sorting Test to assess cognitive flexibility. *Behavior Research Methods*, 53(5), 2083-2091.

<https://doi.org/10.3758/s13428-021-01551-3>

- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The Unity and Diversity of Executive Functions and Their Contributions to Complex “Frontal Lobe” Tasks: A Latent Variable Analysis. *Cognitive Psychology*, *41*(1), 49-100. <https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734>
- Ogden, R. S., MacKenzie-Phelan, R., Montgomery, C., Fisk, J. E., & Wearden, J. H. (2019). Executive processes and timing: Comparing timing with and without reference memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *72*(3), 377-388. <https://doi.org/10.1177/1747021817751869>
- Ogden, R. S., Salominaite, E., Jones, L. A., Fisk, J. E., & Montgomery, C. (2011). The role of executive functions in human prospective interval timing. *Acta Psychologica*, *137*(3), 352-358. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2011.04.004>
- Ogden, R. S., Wearden, J. H., & Montgomery, C. (2014). The differential contribution of executive functions to temporal generalisation, reproduction and verbal estimation. *Acta Psychologica*, *152*, 84-94. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2014.07.014>
- Perbal, S., Droit-Volet, S., Isingrini, M., & Pouthas, V. (2002). Relationships Between Age-Related Changes in Time Estimation and Age-Related Changes in Processing Speed, Attention, and Memory. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, *9*(3), 201-216. <https://doi.org/10.1076/anec.9.3.201.9609>
- Rabbitt, P. (Éd.). (1997). *Methodology Of Frontal And Executive Function*. (pp. 1-38). Hove, UK: Psychology Press. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203344187>
- Rammsayer, T. H., & Brandler, S. (2007). Performance on temporal information processing as an index of general intelligence. *Intelligence*, *35*(2), 123-139. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2006.04.007>
- Rattat, A.-C. (2010). Bidirectional interference between timing and concurrent memory processing in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *106*(2-3), 145-162. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.02.001>
- Rattat, A.-C., & Chevalier, N. (2020). The Different Contribution of Executive Control to Temporal Comparison and Reproduction in Children and Adults. *Journal of Cognition and Development*, *21*(5), 754-773. <https://doi.org/10.1080/15248372.2020.1802278>
- Rattat, A.-C., & Collié, I. (2020). Duration judgments in children and adolescents with and without mild intellectual disability. *Heliyon*, *6*(11).
- Rosales, K. P., Wong, E. H., & Looney, L. (2023). The Psychometric Structure of Executive Functions : A Satisfactory Measurement Model? An Examination Using Meta-

- Analysis and Network Modeling. *Behavioral Sciences (Basel, Switzerland)*, 13(12), 1003. <https://doi.org/10.3390/bs13121003>
- Salthouse, T. A. (1996). The processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychological Review*, 103(3), 403-428. <https://doi.org/10.1037/0033-295x.103.3.403>
- Schuringa, H., Nieuwenhuijzen, M. van, Castro, B. O. de, & Matthys, W. (2017). Executive functions and processing speed in children with mild to borderline intellectual disabilities and externalizing behavior problems. *Child Neuropsychology*, 23(4), 442-462. <https://doi.org/10.1080/09297049.2015.1135421>
- Spaniol, M., & Danielsson, H. (2022). A meta-analysis of the executive function components inhibition, shifting, and attention in intellectual disabilities. *Journal of Intellectual Disability Research*, 66(1-2), 9-31. <https://doi.org/10.1111/jir.12878>
- Survillo, W. W. (1961). Frequency of the alphas rhythm, reaction time and age. *Nature*, 191(4790), 823-824.
- Szelag, E., Kowalska, J., Rymarczyk, K., & Pöppel, E. (2002). Duration processing in children as determined by time reproduction : Implications for a few seconds temporal window. *Acta Psychologica*, 110, 1-19. [https://doi.org/10.1016/S0001-6918\(01\)00067-1](https://doi.org/10.1016/S0001-6918(01)00067-1)
- Theodoraki, T. E., McGeown, S. P., Rhodes, S. M., & MacPherson, S. E. (2020). Developmental changes in executive functions during adolescence : A study of inhibition, shifting, and working memory. *The British Journal of Developmental Psychology*, 38(1), 74-89. <https://doi.org/10.1111/bjdp.12307>
- Treillet, V., Jourdan-Ionescu, C., & Blanchette, I. (2014). Compréhension des émotions et inhibition chez des enfants avec ou sans déficience intellectuelle. *Revue francophone de la déficience intellectuelle*, 25, 97-115. <https://doi.org/10.7202/1028216ar>
- Van der Molen, M. J., Van Luit, J. E. H., Jongmans, M. J., & Van der Molen, M. W. (2007). Verbal working memory in children with mild intellectual disabilities. *Journal of Intellectual Disability Research: JIDR*, 51(2), 162-169. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2788.2006.00863.x>
- Wearden, J. H. (2003). Applying the scalar timing model to human time psychology : Progress and challenges. In *Time and mind II: Information processing perspectives* (p. 21-39). Hogrefe & Huber Publishers.
- Wearden, J. H., O'Rourke, S. C., Matchwick, C., Min, Z., & Maeers, S. (2010). Task switching and subjective duration. *Quarterly Journal of Experimental Psychology (2006)*, 63(3), 531-543. <https://doi.org/10.1080/17470210903024768>
- Williams, J., Crowe, L. M., Dooley, J., Collie, A., Davis, G., McCrory, P., Clausen, H.,

- Maddocks, D., & Anderson, V. (2014). Developmental Trajectory of Information-Processing Skills in Children: Computer-Based Assessment. *Applied Neuropsychology: Child*, 5(1), 35-43. <https://doi.org/10.1080/21622965.2014.939271>
- Zagaria, T., Antonucci, G., Buono, S., Recupero, M., & Zoccolotti, P. (2021). *Executive Functions and Attention Processes in Adolescents and Young Adults with Intellectual Disability*. *Brain Sciences*, 11(1), 42.
- Zélanti, P. S., & Droit-Volet, S. (2011). Cognitive abilities explaining age-related changes in time perception of short and long durations. *Journal of Experimental Child Psychology*, 109(2), 143-157. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.01.003>

1.3.Synthèse et analyses complémentaires

Les deux articles présentant l'Étude 1 nous ont permis d'une part de caractériser le développement avec l'âge des capacités d'estimation des durées, de mise à jour en MDT, d'inhibition, de flexibilité, et de la VTI chez des individus porteurs d'un TDIL âgés de 10 à 20 ans, en comparaison avec des individus TV appariés sur l'AC. Ils ont également permis de préciser les fonctions cognitives impliquées dans les difficultés d'estimation des durées associées au TDIL. Les résultats mettent en évidence des performances inférieures dans l'ensemble des FE et la VTI chez les individus porteurs d'un TDIL en comparaison avec celles d'individus au développement typique. On retrouve également une augmentation des performances avec l'âge sur certaines tâches (Empan dynamique verbal, Empan dynamique spatial, 2-back, GNG, WCST, CRT, et la reproduction temporelle). Enfin, nos données suggèrent, et ce pour la première fois, que les difficultés d'estimation des durées observées dans le TDIL ne seraient pas dues à un trouble du traitement de l'information temporelle mais bien à un trouble de certaines fonctions cognitives qui seraient impliquées dans l'estimation des durées (FE et VTI).

Nous présentons maintenant des analyses complémentaires afin de prendre en compte simultanément les résultats des Articles 2 et 3. La première analyse permettra d'examiner et de quantifier plus précisément s'il existe un retard cognitif, et si oui de quelle ampleur (estimation des durées, FE, VTI), chez les enfants porteurs d'un TDIL par rapport aux enfants TV. Pour cela, nous analyserons et comparerons donc les performances des groupes TV à celles des groupes porteurs d'un TDIL. Les performances de chaque groupe d'enfants porteurs d'un TDIL seront dans un premier temps comparées à celles du groupe d'enfants TV de même AC. Si les performances ne diffèrent pas statistiquement, on considèrera alors qu'il n'existe pas de retard. En revanche, si les performances des enfants porteurs d'un TDIL sont inférieures à celles des enfants TV de même AC, elles seront ensuite comparées à celles des enfants TV du groupe d'âge inférieur et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'on ne trouve plus de différence significative entre les performances des 2 groupes. Nous avons inclus un groupe d'enfants TV âgés de 7 à 9 ans afin de pouvoir quantifier le retard des enfants porteurs d'un TDIL les plus jeunes (âgés de 10 à 12 ans) dans les cas où leurs performances sont inférieures à celles des enfants TV de même AC et sur les tâches pour lesquelles il existe un effet d'âge (Empan dynamique verbal, Empan dynamique spatial, 2-back, GNG, WCST, CRT, et la reproduction temporelle). La seconde analyse consistera à déterminer la part d'implication de chaque fonction cognitive

étudiée (inhibition, mise à jour en MDT, flexibilité cognitive, VTI) dans les difficultés d'estimation des durées des individus porteurs d'un TDIL.

1.2.1 Quantification du retard cognitif dans le TDIL

Comme expliqué ci-dessus, afin de déterminer si les difficultés des enfants porteurs d'un TDIL traduisent un retard de développement et de quantifier l'ampleur de ce retard, leurs performances doivent être comparées à celles de participants plus jeunes. Cette comparaison permettra de vérifier si les performances des participants TV plus jeunes sont comparables à celles de sujets plus âgés porteurs d'un TDIL, suggérant alors un retard de développement. Des analyses de type t-test ont été réalisées entre les groupes d'enfants porteurs d'un TDIL et les groupes d'enfants TV, en ajustant le seuil alpha ($05/nb$ de comparaisons) en fonction du nombre de comparaisons effectuées (Tableau 1, 2, 3 Annexe 2). Dans la mesure nous avons comparé les performances moyennes de groupes d'âge, il est important de préciser que la quantification du retard moyen des participants porteurs d'un TDIL comparativement à celles des participants TV sera basée sur la valeur moyenne de chaque classe d'âge (par exemple, 11 ans pour le groupe d'âge 10-12 ans).

Au niveau de la variabilité des reproductions de durées, il existe un retard d'environ 4 ans chez les enfants porteurs d'un TDIL âgés de 10 à 12 ans, ce retard atteint environ 7 ans chez les enfants porteurs d'un TDIL âgés de 13 à 16 ans, et continue d'augmenter jusqu'à 11 ans chez les enfants porteurs d'un TDIL âgés de 17 à 20 ans. Aucun retard n'est observé pour la précision des reproductions de durées, c'est-à-dire que pour chaque groupe d'âge, les performances des participants porteurs d'un TDIL ne diffèrent pas significativement de celles des participants TV.

Dans la tâche de GNG, les 3 tâches de mise à jour en MDT et la tâche WCST, on observe un retard d'au moins 3 ans chez les enfants porteurs d'un TDIL âgés de 10 à 12 ans, ce retard augmente jusqu'à environ 7 ans à l'âge de 13-16 ans et augmente encore jusqu'à 11 ans à l'âge de 17-20 ans. Les performances à la tâche CRT indiquent quant à elle un retard un peu moins important puisqu'il est d'environ 3 ans chez les enfants porteurs d'un TDIL âgés de 10 à 12 ans, 4 ans chez ceux âgés de 13 à 16 ans, et environ 8 ans chez ceux âgés de 17 à 20 ans.

En résumé, nos données suggèrent donc dans le cas de l'hypothèse d'un retard dans le TDIL, que son ampleur augmente sur plusieurs fonctions cognitives. Afin de statuer sur l'existence d'un retard (les difficultés sont rattrapées à l'âge adulte) ou d'un déficit (les difficultés ne sont pas rattrapées à l'âge adulte), il serait nécessaire de proposer le même

protocole à un groupe d'adultes âgés de plus de 20 ans pour vérifier si ce retard continue de s'amplifier, stagne ou bien est rattrapé à un âge plus avancé. De plus, lorsque les performances des plus jeunes enfants porteurs d'un TDIL (10-12 ans) sont significativement inférieures à celles du groupe TV 7-9 ans (Empan dynamique verbal, Empan dynamique spatial, 2-back, WCST, GNG), il nous a été impossible de quantifier précisément le retard, pour cela l'inclusion d'un groupe de jeunes TV âgés de moins de 7 ans serait nécessaire.

1.2.2 L'importance de chaque fonction cognitive impliquée dans les difficultés d'estimation des durées dans le TDIL

Afin de déterminer les fonctions cognitives impliquées dans les difficultés observées dans les capacités d'estimation des durées chez les individus porteurs d'un TDIL, il est nécessaire d'analyser ensemble les résultats des Articles 2 et 3. En effet, ces données mettent en évidence, de manière indépendante, le rôle des capacités de mise à jour en MDT d'une part (Article 2), et celles d'inhibition et de VTI d'autre part (Article 3) dans les difficultés d'estimation des durées des individus porteurs d'un TDIL. Plus spécifiquement, les performances de mise à jour en MDT (score composite) et de VTI expliqueraient en partie la moins bonne précision des reproductions de durées des individus porteurs d'un TDIL. Les capacités de mise à jour en MDT et d'inhibition (mesurée avec la tâche GNG) expliqueraient quant à elles la variabilité plus importante de leurs reproductions de durées. Nous souhaitons donc réaliser une seule et même analyse intégrant l'ensemble des performances des 10 tâches afin de déterminer la part d'implication de chacune dans les performances d'estimation des durées en prenant en compte leurs potentielles covariances. Nous examinerons également le lien entre les FE, la VTI et les performances à la tâche de bissection temporelle, analyse n'ayant pas pu être intégrée dans les articles. En effet, comme expliqué dans l'Article 2, en raison de l'hétérogénéité des patrons de réponses des participants porteurs d'un TDIL à cette tâche, les variables classiquement utilisées n'ont pas pu être calculées (à savoir le point de bissection pour la précision et le ratio de Weber pour la variabilité). Nous proposons donc ici de réaliser des analyses examinant le lien entre les FE, la VTI et l'estimation des durées sur la tâche de bissection en utilisant une variable intra-sujets (pourcentage de réponses long en fonction des 7 durées de référence, pour plus de détails voir la méthode de l'Article 2).

Dans un premier temps, nous avons effectué une série de régressions linéaires multiples pour examiner dans quelle mesure les performances cognitives prises toutes ensemble (mise à

jour en MDT, inhibition, flexibilité, VTI) expliquaient la variance observée dans les scores de précision et de variabilité de la tâche de reproduction de durées en fonction du groupe et de l'âge. Tout d'abord, nous avons réalisé une analyse de régression linéaire multiple avec le score de précision de la tâche de reproduction temporelle comme variable dépendante, le groupe et l'âge comme facteurs fixes, le sexe en covariable et les performances aux 10 tâches cognitives comme variables indépendantes. Le modèle était significatif ($F(16,169) = 6.31, p < .001$) et représentait 40 % de la variance totale ($R^2 = .40$). Les résultats spécifiques du modèle ont montré que les effets des variables Groupe et Âge n'étaient plus significatifs (tous les $ps > .05$), et que les prédicteurs significatifs étaient le score au CTS ($\beta = 0.16 ; p = .048$), le score d'empan verbal ($\beta = 0.003 ; p = .022$), le score au MIT ($\beta = 0.47 ; p = .005$) et le score au CRT ($\beta = 1.68 ; p < .001$). En d'autres termes, la variance du score de précision de la tâche de reproduction de durées due à la présence ou à l'absence d'un TDIL et à l'avancée en âge est expliquée principalement par la VTI (CRT), ensuite par les capacités d'inhibition (MIT), puis celles de mise à jour en MDT (Empan verbal) et enfin celles de flexibilité (CTS).

La seconde analyse de régression linéaire multiple a été réalisée sur le score de variabilité des performances à la tâche de reproduction de durées comme variable dépendante, et le sexe en covariable. Le modèle était significatif ($F(16,169) = 5.06, p < .001$) et représentait 35 % de la variance totale ($R^2 = .35$). Les résultats spécifiques du modèle ont montré que les effets des variables Groupe et Âge n'étaient plus significatifs (tous les $ps > .05$) et que le seul prédicteur significatif était le score d' de la tâche GNG ($\beta = -0.05 ; p = .012$). Ainsi, ces données suggèrent que les variations de la performance d'inhibition sur la tâche de GNG expliquent à elles seules, parmi les facteurs cognitifs étudiés, la majeure partie de la variance du score de variabilité des performances à la tâche de reproduction de durées due à la présence ou à l'absence d'un TDIL et à l'augmentation de l'âge.

En conclusion, ces résultats fournissent davantage de précision sur la manière dont les FE et la VTI impactent la précision et la variabilité des reproductions temporelles. Tandis que seules les performances sur une tâche d'inhibition motrice, à savoir la tâche GNG, expliquent la plus grande variabilité des reproductions temporelles dans le TDIL, la précision des reproductions temporelles serait quant à elle principalement expliquée par la VTI (CRT), puis dans un second temps par les capacités d'inhibition mesurées par la tâche GNG, dans un troisième temps les capacités de mise à jour en MDT mesurées par la tâche d'Empan verbal, et enfin les capacités de flexibilité cognitive mesurées par la tâche de CTS.

Dans un second temps, nous avons effectué des analyses sur les performances à la tâche de bissection temporelle, celles-ci n'ayant pas été intégrées dans les articles. Le lien entre les performances à la tâche de bissection et celles de mise à jour en MDT avaient été investiguées dans l'Article 2, l'objectif de cette partie est donc d'examiner le lien entre les performances aux tâches d'inhibition, de flexibilité et de VTI. Des ANCOVAs indépendantes sur la proportion de réponses long à la tâche de bissection, avec en covariable la VD de chacune de ces 7 tâches cognitives ont donc été réalisées (Tableau 4).

Tableau 4 : Analyses des performances à la tâche de bissection temporelle

TACHE	GROUPE		
	Durée	Age × Durée	Groupe × Durée
WCST	$p < .001^{***}$, $\eta^2_p = .42$	$p < .05^*$, $\eta^2_p = .03$	$p < .001^{***}$, $\eta^2_p = .15$
CTS	$p < .001^{***}$, $\eta^2_p = .33$	$p < .05^*$, $\eta^2_p = .028$	$p < .001^{***}$, $\eta^2_p = .16$
ARTS	$p < .0001^{***}$, $\eta^2_p = .37$	$p < .05^*$, $\eta^2_p = .03$	$p < .001^{***}$, $\eta^2_p = .17$
RAST	$p < .001^{***}$, $\eta^2_p = .43$	$p < .05^*$, $\eta^2_p = .03$	$p < .001^{***}$, $\eta^2_p = .15$
MS	$p < .001^{***}$, $\eta^2_p = .09$	$p < .05^*$, $\eta^2_p = .003$	$p < .001^{***}$, $\eta^2_p = .15$
GNG	$p > .05$	$p > .05$,	$p < .001^{***}$, $\eta^2_p = .05$
CRT	$p < .001^{***}$, $\eta^2_p = .17$	$p > .05$,	$p < .001^{***}$, $\eta^2_p = .10$

Les analyses montrent que les effets de durée sont préservés avec des tailles d'effet réduites pour l'ensemble des tâches, à l'exception de la tâche de GNG pour laquelle l'effet de durée disparaît ($p > .05$). En d'autres termes, de bonnes capacités d'inhibition seraient nécessaires pour discriminer avec précision les durées. Concernant l'interaction Age × Durée (qui indique que les performances temporelles s'améliorent avec l'âge), les effets sont maintenus avec des tailles d'effet similaires pour l'ensemble des tâches, à l'exception de la tâche GNG pour laquelle l'effet de la durée disparaît ($p > .05$) et de la tâche CRT pour laquelle la taille d'effet diminue. Le fait que la pente des courbes de bissection soit de plus en plus abrupte avec l'âge, traduisant une amélioration des capacités de discrimination temporelle, s'expliquerait par l'amélioration des capacités d'inhibition mesurées avec la tâche GNG et par l'accélération de la VTI mesurée avec la tâche CRT. Enfin, concernant l'interaction Groupe × Durée (qui indique que les performances temporelles sont moins bonnes dans le groupe TDIL que dans le groupe TV), les effets sont tous maintenus avec des tailles d'effet similaires pour l'ensemble des tâches, à l'exception de la tâche GNG pour laquelle la taille d'effet diminue. En d'autres termes, les enfants TV présentant de meilleures capacités d'inhibition sur la tâche de GNG parviennent à mieux discriminer les durées dans une tâche de bissection que les enfants porteurs d'un TDIL.

En conclusion, les performances d'inhibition sur la tâche de GNG et la VTI expliquent partiellement l'effet de l'âge et du groupe sur la capacité de discrimination des durées dans la tâche de bissection temporelle. En revanche, les performances aux tâches de flexibilité ne semblent pas en lien avec ces capacités temporelles. Ces résultats sont toutefois à nuancer dans la mesure que seules les performances à la tâche de GNG semblent impliquées dans les performances temporelles à la tâche de bissection, et non celles aux 2 autres tâches mesurant également l'inhibition (MIT et RAST). Ces données sont compatibles avec les résultats observés sur la tâche de reproduction, pour laquelle les performances d'inhibition à la tâche GNG et la VTI mesurée avec la tâche CRT étaient les facteurs explicatifs principaux.

A retenir

- Il existe un retard dont l'ampleur augmente avec l'âge (au moins 3 ans pour les enfants porteurs d'un TDIL âgés de 10 à 12 ans, 7 ans pour les enfants porteurs d'un TDIL âgés de 13 à 16 ans et 11 ans pour les enfants porteurs d'un TDIL âgés de 17 à 20 ans) pour 6 tâches (Empan dynamique verbal, Empan dynamique spatial, 2-back, GNG, WCST variabilité des reproductions de durées). Pour la VTI (CRT) le retard est constant jusqu'à 16 ans et augmente à 17 ans (8 ans environ).
- Dans une tâche de reproduction temporelle, les difficultés liées à l'âge ou au TDIL sont expliquées pour la variabilité uniquement par les performances d'inhibition sur la tâche de GNG, tandis que pour la précision sont impliquées respectivement dans cet ordre la VTI, les performances d'inhibition (MIT), de mise à jour en MDT (Empan verbal) et de flexibilité cognitive (CTS)
- Dans une tâche de bissection temporelle, les performances d'inhibition (GNG) et dans une moindre mesure la VTI (CRT) expliquent les difficultés temporelles liées à l'âge et au groupe.

Conclusion

Les résultats de l'Étude 1 soutiennent l'hypothèse selon laquelle les difficultés d'estimation de durées dans le TDIL idiopathique sont dues, en grande partie, à des capacités exécutives plus faibles ainsi qu'à une VTI ralentie. Ils contribuent également à la littérature scientifique sur l'implication de ces fonctions cognitives dans le traitement temporel. Au regard de ces résultats, il est possible de se demander dans quelle mesure un entraînement cognitif pourrait permettre l'amélioration des capacités d'estimation des durées, des FE et de VTI chez des individus porteurs d'un TDIL. Les résultats de l'étude 2 ayant pour ambition d'amener des éléments de réponse à cette question, seront présentés dans la prochaine section.

2. Étude 2

2.1 Article 4 : Étude de l'impact d'un entraînement cognitif sur les capacités d'estimation des durées et exécutives chez des adolescents porteurs d'un Trouble du Développement Intellectuel Léger (TDIL)

Les données de l'Étude 1 nous ont conduit à nous questionner sur la possibilité d'entraîner les fonctions cognitives qui semblent altérées dans le TDIL. C'est donc dans ce contexte que nous avons cherché à proposer un entraînement cognitif sur un petit échantillon d'individus porteurs d'un TDIL avec l'objectif d'identifier les conditions de faisabilité et d'efficacité d'un entraînement cognitif auprès de ce public spécifique. L'objectif à plus long terme est de proposer des pistes de réflexion et d'accompagnement aux professionnels de santé.

Cet article empirique a été soumis et est actuellement en révision dans la revue ANAE *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant* dans le cadre d'un numéro spécial sur le TDIL. Il a fait l'objet d'une communication orale au congrès du GREPACO qui s'est tenu en mai 2024 à Toulouse.

Étude de l'impact d'un entraînement cognitif sur les capacités d'estimation du temps et exécutives chez des adolescents porteurs d'un Trouble du Développement Intellectuel Léger (TDIL)

Elsa Gourlat, Anne-Claire Rattat, & Cédric, T. Albinet

Laboratoire Sciences de la Cognition, Technologie, Ergonomie (SCoTE), Université de Toulouse, INU Champollion, 81012 Albi Cedex 9, France

+33 (0)5 63 48 19 71

La correspondance doit être adressée à Elsa Gourlat (elsa.gourlat@hotmail.fr)

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements aux membres de l'équipe médico-éducative ainsi qu'aux jeunes de l'Institut Médico Educatif la Vergnière ayant participé à l'étude pour leur contribution à ce projet. Nous tenons également à remercier Benoît Valéry pour son aide dans l'implémentation des tâches cognitives informatisées.

RESUME

Un entraînement de 12 semaines composé de jeux mobilisant les fonctions cognitives a été proposé à des adolescents porteurs de Trouble du Développement Intellectuel Léger (TDIL) âgés de 11 à 14 ans, afin d'évaluer son impact sur les capacités exécutives et temporelles, toutes deux déficitaires dans le TDIL. Bien qu'il soit difficile de conclure sur l'efficacité réelle de cet entraînement en raison d'une forte variabilité inter-individuelle, les résultats suggèrent l'intérêt et la faisabilité d'un tel programme.

Mots clés : Trouble du Développement Intellectuel Léger (TDIL), entraînement cognitif, fonctions exécutives, estimation du temps

SUMMARY

A 12-week cognitive training program consisting of games involving cognitive functions was proposed to adolescents with Mild Intellectual Disability (MID) aged 11 to 14, in order to assess its impact on executive and temporal abilities, both of which are deficient in MID. Although it is difficult to conclude on the actual effectiveness of this training due to high inter-individual variability, the results suggest the interest and feasibility of such a program.

Keywords: Mild Intellectual Disability (MID), cognitive training, executive functions, time estimation

RESUMEN

Un programa de entrenamiento de 12 semanas que consiste en juegos que implican funciones cognitivas se ha propuesto a adolescentes con Discapacidad Intelectual Leve (DIL) de 11 a 14 años, con el fin de evaluar su impacto en las capacidades ejecutivas y temporales, ambas deficitarias en el DIL. Aunque es difícil concluir sobre la eficacia real de este entrenamiento debido a la gran variabilidad interindividual, los resultados sugieren el interés y la viabilidad de un programa de este tipo.

Palabras clave: Discapacidad Intelectual Leve (DIL); entrenamiento cognitivo; funciones ejecutivas; estimación temporal

Introduction

Le Trouble du Développement Intellectuel Léger (TDIL) est un trouble neurodéveloppemental encore très peu étudié malgré sa forte prévalence (1 à 2 % en France ; Inserm, 2016), accentuant ainsi la difficulté à en dresser le tableau clinique et cognitif précis (Gourlat et al., sous presse). De plus, les professionnels de santé expriment le manque de connaissances et d'outils lorsqu'il est question de l'accompagnement de ces personnes. Pour évoluer de manière adaptée à son environnement, estimer le temps avec précision est une compétence centrale (Zakay, 2012). Or, cette compétence est retardée, voire parfois jamais maîtrisée sans aide extérieure chez les personnes porteuses d'un TDIL (Rattat & Collié, 2020b). Toutefois, parmi les ressources cognitives impliquées dans l'estimation du temps, les fonctions exécutives ont été reconnues comme particulièrement importantes (Ogden et al., 2014). Au regard de ces travaux, une étude chez des enfants et adolescents porteurs de TDIL âgés de 7 à 20 ans a récemment montré que leur retard dans le développement des capacités d'estimation du temps est en grande partie expliqué par un déficit de mise à jour en mémoire de travail (MDT, Gourlat et al., 2023). Il est alors possible d'envisager que si le fonctionnement exécutif de ces enfants est amélioré, alors leurs capacités d'estimation du temps pourraient l'être également.

L'objectif de la présente étude était d'examiner la faisabilité et l'efficacité d'un programme d'entraînement cognitif chez des adolescents porteurs de TDIL idiopathique (dont la cause n'est pas connue), sur le fonctionnement exécutif et les capacités d'estimation du temps, avec l'ambition à terme de pouvoir fournir des pistes de réflexion et d'accompagnement aux professionnels de santé.

Le trouble du développement intellectuel léger (TDIL)

Le diagnostic de TDI repose sur 3 critères : un déficit du fonctionnement intellectuel mis en évidence par un test standardisé et étalonné (quotient intellectuel compris entre 50 et 70, ± 5) ; des limitations du comportement adaptatif dans les domaines conceptuel, social et pratique ; et l'apparition de ces difficultés au cours de la période développementale, c'est-à-dire avant 18 ans (Inserm, 2016a). Le TDIL se traduit par une compréhension limitée des situations sociales (domaine social), l'accès à des métiers n'impliquant pas des habiletés cognitives complexes (domaine pratique) et des capacités de raisonnement limitées (domaine conceptuel ; APA, 2013). Le tableau clinique demeure variable d'un individu à l'autre en

raison de la pluralité des étiologies et de la présence fréquente de comorbidités (Bussy, de Fréminville, et al., 2016). C'est en partie pour cela que les recherches récentes s'accordent sur l'étude préférentielle des formes dites idiopathiques qui représentent 80 % des TDIL (Inserm, 2016a) et présentent l'avantage de comporter moins de troubles associés.

Des difficultés cognitives, et plus particulièrement exécutives ont été mises en évidence chez les personnes porteuses de TDIL (pour une revue récente, voir Gourlat et al., sous presse). On retrouve principalement une altération des composantes d'inhibition, de mise à jour en MDT, de flexibilité cognitive, de stratégies de résolution de problèmes et de prise de décision. Par ailleurs, le comportement adaptatif serait prédit par les fonctions exécutives, plus que par l'intelligence (Gravråkmo et al., 2023). Concernant l'estimation du temps, les enfants et adolescents porteurs de TDIL présentent un retard d'estimation des durées (Gourlat et al., 2023; Rattat & Collié, 2020b), celui-ci étant principalement dû à de moindres capacités exécutives, et plus particulièrement de mise à jour en MDT (Gourlat et al., 2023).

D'un point de vue développemental, de nombreux travaux se sont intéressés à l'évolution avec l'âge des capacités exécutives (pour une revue récente voir Fourneret & des Portes, 2017). Parmi ceux-ci, l'étude de Theodoraki et al. (2020) confirme l'existence de trajectoires développementales différentes pour l'inhibition, la flexibilité et la mise à jour en MDT au cours de l'enfance et de l'adolescence (c.-à-d que chaque fonction ne mature pas au même âge et à la même vitesse et peut également varier d'un individu à un autre). Les études portant sur des enfants et adolescents porteurs de TDIL non idiopathique (Fidler & Lanfranchi, 2022; Spaniol & Danielsson, 2022) et idiopathique (Gourlat et al., 2023, Gourlat et al., sous presse) suggèrent un retard dans le développement des fonctions exécutives par rapport à des jeunes de même âge chronologique.

Protocoles d'intervention auprès de personnes porteuses d'un TDIL

La difficulté d'accompagnement des personnes porteuses d'un TDIL est à la fois liée à un manque d'outils spécifiques adaptés (P. J. G. Nouwens et al., 2020; P. J. G. Nouwens, Smulders, et al., 2017) et à la difficulté à dresser un tableau cognitif commun à tous les individus (Bussy, de Fréminville, et al., 2016). Des entraînements cognitifs centrés sur la MDT (Danielsson et al., 2015b; Orsolini et al., 2015, 2019; van der Molen, 2010) ont néanmoins été proposés à cette population (pour une revue, Gourlat et al., sous presse). Une amélioration des capacités de MDT en condition verbale et visuo-spatiale a été mise en

évidence, bien que celle-ci ne se soit pas systématiquement maintenue sur le long terme et que les possibilités de transfert à d'autres fonctions aient été également disparates (Bussy, de Fréminville, et al., 2016). Il existe dans ces travaux d'importantes limitations méthodologiques (échantillons faibles, étiologies différentes, niveaux cognitifs initiaux hétérogènes) qui modulent les résultats. Malgré ces limites, ils attestent de la faisabilité d'un entraînement cognitif chez des personnes porteuses de TDIL et permettent de dégager plusieurs principes d'intervention : utiliser un échantillon avec des participants dont l'étiologie du TDIL est la même, dont le tableau cognitif est similaire (évaluation neuropsychologique en amont) et moduler certains paramètres en fonction des spécificités de cette population (pour une revue, voir Gourolat et al., sous presse). Parmi ces paramètres, on retiendra : susciter l'intérêt et la motivation, utiliser des supports visuels, proposer des aides et la répétition des items, utiliser des formats ludiques, adapter le niveau de difficultés aux capacités de chacun, proposer des séances fréquentes, multimodales (verbale et visuelle) et portant sur plusieurs fonctions cognitives distinctes. Par ailleurs, l'entraînement le plus efficace comprendrait 8 à 10 séances de 6 à 20 minutes, réparties sur 5 jours par semaine, pendant une période assez restreinte de quelques semaines. En suivant ces paramètres, nous avons mis au point un entraînement cognitif qui utilise comme support des jeux de société (aspect ludique et motivationnel, aspect visuel) mobilisant plusieurs fonctions cognitives à la fois (aspect multifonctionnel). Il comprend 36 séances réparties sur 12 semaines (aspect intensif). Chaque adolescent est accompagné par l'expérimentatrice qui est là pour mobiliser, étayer, réexpliquer au besoin et adapter les jeux au niveau de chacun (aspect relationnel). L'adolescent est amené à réfléchir et à identifier ses stratégies, ses forces et ses difficultés (aspect métacognitif). Notre hypothèse était qu'un tel entraînement cognitif proposé à des adolescents porteurs de TDIL devrait améliorer leurs capacités exécutives et d'estimation du temps.

Méthode

Recrutement

Dans les études sur le TDIL, le recrutement est une étape à la fois cruciale et complexe. En effet, l'accès à une population tenant compte de l'ensemble des critères d'inclusion et d'exclusion au sein d'un même établissement est extrêmement difficile. À cela s'ajoute la difficulté d'obtenir dans un premier temps l'accord de l'établissement, puis celui des parents, des adolescents et enfin l'adhésion de l'équipe éducative. Pour toutes ces raisons, seul un

échantillon de 10 adolescents de la même tranche d'âge a pu être constitué. La tranche d'âge la plus réduite (écart entre l'âge minimal et l'âge maximal), la plus basse (adolescents les plus jeunes possible) et la plus accessible (effectif le plus important d'adolescents du même âge au sein d'un même établissement) a été visée, minimisant ainsi les différences cognitives interindividuelles.

Participants

Dix adolescents porteurs de TDIL idiopathique sans trouble associé et âgés de 11 à 14 ans ont été recrutés pour participer à cette étude ($M = 13$ ans et 7 mois, $\sigma = 7$ mois), dont 50 % de, dans un même institut médico-éducatif (IME) de la région Ariégeoise. Les critères d'inclusion comprennent l'âge des participants et un diagnostic préalable de TDIL idiopathique. Les critères d'exclusion comprennent l'existence de toute autre pathologie, trouble du neurodéveloppement ou trouble psychiatrique diagnostiqué (troubles des apprentissages, troubles de l'attention, troubles mentaux), ainsi que l'existence d'une étiologie connue (trisomie 21, trouble du spectre de l'autisme).

Matériel

Les jeux supports sélectionnés pour les séances d'entraînement sont des jeux de société éducatifs issus pour la plupart d'une formation professionnelle dispensée par Bigouret et Vannetzel dans l'ANAE (Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant ; cf. Annexe 1, matériel supplémentaire en ligne). Les jeux mobilisent plusieurs fonctions cognitives, notamment exécutives. La moitié fait davantage appel à la cognition froide, c'est-à-dire renvoie à des problèmes abstraits ou décontextualisés et l'autre moitié davantage à la cognition chaude, c'est-à-dire implique des composantes émotionnelles et affectives.

Pour évaluer la faisabilité du programme d'entraînement, nous avons recueilli le taux de participation des adolescents au programme, le respect de la durée des séances et le degré d'adaptation des tâches aux spécificités du TDIL. Ces éléments ont été évalués grâce à des échelles d'évaluation remplies à la fois par les professionnels de l'établissement et les adolescents.

Échelles d'évaluation à destination des adolescents. Trois dimensions ont été évaluées après chaque séance : l'intérêt perçu, la difficulté perçue et la durée ressentie. Pour l'intérêt perçu, l'adolescent a complété l'échelle de Lickert suivante : 1 - pas d'intérêt, à 5 - beaucoup d'intérêt. Pour la difficulté perçue, il a complété également une échelle de Lickert allant de 1 à 5 avec 1 - très difficile à 5 - très facile. Enfin, pour la durée ressentie, l'adolescent a complété une échelle correspondant à la durée ressentie de la séance avec 1 - très long à 5 - court (cf. Annexe 2, matériel supplémentaire en ligne, <https://osf.io/cp8db>).

Questionnaire d'évaluation à destination des professionnels. À la fin du programme, les membres de l'équipe de l'IME ont complété un questionnaire en ligne dans lequel il leur était demandé via des questions ouvertes si le programme avait posé des difficultés matérielles et/ou organisationnelles et s'ils avaient observé des bénéfices ou des effets néfastes sur les adolescents (cf. Annexe 3, matériel supplémentaire en ligne, <https://osf.io/cp8db>).

Pour examiner l'efficacité du programme d'entraînement, chaque adolescent a complété, une fois avant et une fois après l'entraînement, 6 tâches évaluant la vitesse de traitement de l'information, les fonctions exécutives (inhibition, flexibilité, mise à jour en MDT) et l'estimation du temps. Les tâches exécutives et temporelles ont déjà été utilisées auprès d'un large échantillon présentant un TDIL (âgé de 7 ans à 20 ans) et ont montré leur sensibilité à discriminer les performances de cette population en comparaison à celles de participants tout-venants appariés sur l'âge chronologique (Gourlat et al., 2023).

Vitesse de traitement de l'information. Une tâche de temps de réaction à deux choix (adaptée de Albinet et al., 2012)) consistant à identifier et répondre (appui sur un bouton) à un stimulus (flèche dirigée vers la droite ou vers la gauche) le plus rapidement possible a été proposée. La mesure était le temps de réaction (TR en ms) pour les réponses correctes. Plus celui-ci était court, plus l'adolescent était performant (traitait rapidement l'information).

Inhibition. La tâche de Go No-Go (adaptée de Chevalier et al., 2014) consistait à identifier un stimulus cible (attraper un poisson) et à éviter les stimuli distracteurs (ne pas attraper les poissons rouge et jaune). La mesure était la sensibilité à l'inhibition calculée par le score d' (voir Tanner & Swets, 1954). Plus le score d' était élevé, meilleure était la performance d'inhibition.

Flexibilité. La tâche de flexibilité (adaptée de Chevalier, 2018) impliquait pour les

adolescents de classer des objets selon 2 critères (forme ou couleur). D'essai en essai, la règle de classement se répétait ou changeait, imposant à l'adolescent de mettre à jour de façon dynamique un critère de classement. Les TR et la précision des réponses étaient recueillis. La mesure était le coût de flexibilité, calculé comme la différence de TR entre les essais où la règle changeait et les essais où la règle se répétait. Plus le coût de flexibilité était faible, meilleure était la performance de flexibilité.

Mise à jour en MDT. La tâche d'empan dynamique spatial (adaptée de Albinet et al., 2012)) impliquait pour les adolescents de reproduire dans l'ordre les 3 dernières localisations spatiales d'une séquence de 6, 8, 10 ou 12 stimuli lumineux dont ils ne connaissaient pas à l'avance la longueur, dans une matrice de 16 touches (4×4). Ces séquences étant répétées 2 fois, les adolescents obtenaient ainsi un score sur 24 points, correspond au nombre total de bonnes réponses. Plus ce score était élevé, meilleure était la performance de mise à jour en MDT.

Estimation du temps. La capacité à estimer des durées a été évaluée via une tâche de reproduction temporelle (adaptée de Droit-Volet et al., 2015), dans laquelle il était demandé de reproduire la durée d'un stimulus cible (cercle bleu affiché à l'écran). Les deux mesures de cette tâche sont la précision et la variabilité. Pour la précision (score compris entre -1 et +1), plus le score était proche de 0, plus les reproductions temporelles étaient précises (proches de la durée à reproduire). Un score au-dessus de 0 correspondait à une surestimation du temps et un score en dessous de 0 à une sous-estimation du temps. Concernant la variabilité, plus le score était faible, moins les reproductions temporelles étaient variables, reflétant une performance plus stable.

Procédure

L'échantillon a été séparé en 2 groupes (*Figure 1*). Les 5 adolescents du groupe contrôle ont simplement bénéficié des prises en charge classiques de l'IME (suivis médicaux, paramédicaux et enseignements). Les 5 adolescents du groupe entraînement ont quant à eux bénéficié en plus de séances d'entraînement cognitif détaillées ci-dessous.

Évaluations pré-entraînement

Les 6 tâches ont été réalisées individuellement par l'ensemble des adolescents en amont du programme d'entraînement entre le 20 et le 31 mars 2023.

Programme d'entraînement

Pour les adolescents du groupe entraînement, le programme s'est déroulé sur 12 semaines. Chaque adolescent a pu bénéficier d'un total de 36 séances de 30 minutes, à une fréquence de 3 séances par semaine entre le 3 avril et le 30 juin 2023. L'emploi du temps a été fixé en amont en tenant compte des disponibilités sur leur emploi du temps (cf. Annexe 4, matériel supplémentaire en ligne, <https://osf.io/cp8db>).

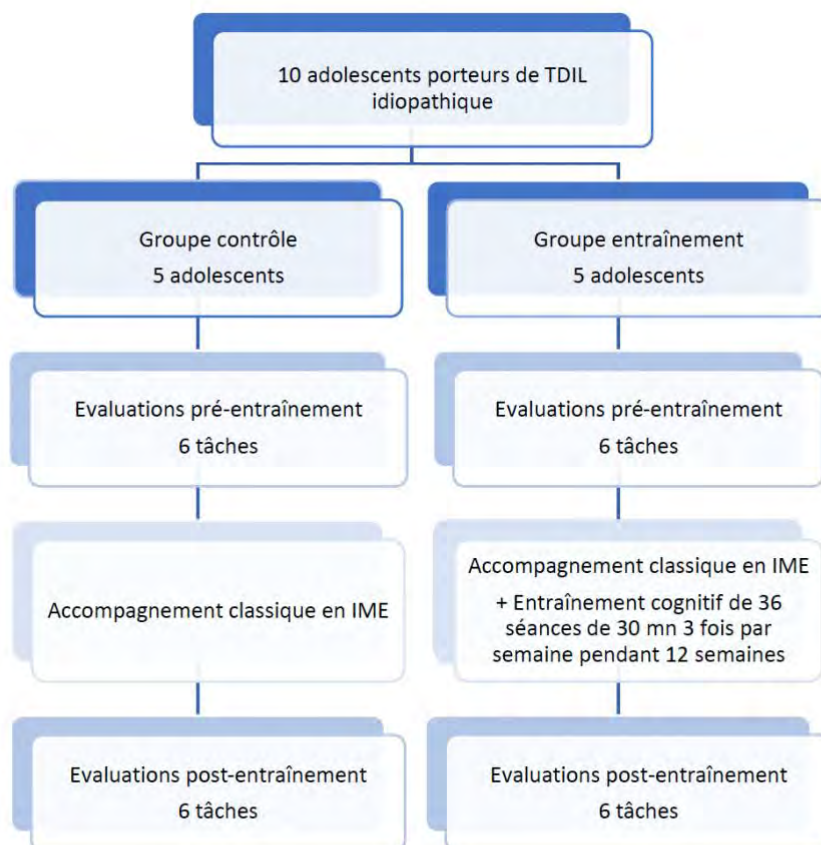


Figure 1. Déroulé de l'étude (groupe contrôle et groupe entraînement)

Chaque séance comprenait une phase introductive, permettant d'établir l'alliance thérapeutique avec l'adolescent et de présenter l'objectif de la séance (environ 5 min), l'utilisation d'un jeu mobilisant plusieurs fonctions cognitives comme support de la séance (environ 20 min) et enfin une phase de conclusion durant laquelle l'adolescent répondait aux questionnaires d'évaluation (environ 5 min). Quinze jeux supports ont été sélectionnés et ont été réutilisés 3 à 4 fois chacun en ajustant le niveau de difficulté selon les capacités de l'adolescent. La difficulté était augmentée en complexifiant le jeu et en ajoutant des règles

si l'adolescent était en réussite. De la même manière, la charge exécutive pouvait être réduite en simplifiant le jeu et en supprimant des règles s'il était en échec. Enfin, la charge exécutive était maintenue s'il était en réussite mais seulement avec l'aide de l'expérimentatrice. Les séances comportant des activités faisant davantage appel à la cognition froide étaient présentées en alternance avec celles faisant davantage appel à la cognition chaude.

Exemple de séance travaillant principalement la cognition froide :

La séance débutait par une phase introductive de 5 minutes. On demandait à l'adolescent comment il allait, et quelle était son humeur du jour à l'aide de personnages incarnant différentes émotions (joie, colère, tristesse, neutre). Ce temps permettait l'instauration d'une alliance thérapeutique efficace et de créer un rituel rassurant favorisant la capacité de l'adolescent à adhérer à l'activité. Dans un second temps, le jeu support de la séance était présenté. Par exemple ici, la séance utilisait Panic Lab (Panic lab. 2011), un jeu composé de « cartes monstre » de différentes formes, différentes couleurs et différents pelages et de « cartes action » permettant de se déplacer ou de modifier la couleur, la forme ou le pelage d'un monstre. Les cartes étaient organisées en cercle et l'adolescent devait le plus rapidement possible, en fonction des dés, identifier le monstre cible (couleur, forme, pelage). Ce jeu mobilisait à la fois l'inhibition (sélectionner le bon monstre, éviter les monstres ne correspondant pas aux critères), la flexibilité (3 critères – forme, couleur, pelage – qui étaient modifiés en cours de recherche lorsque l'adolescent passait par une case action impliquant le changement de la couleur, la forme ou le pelage du monstre cible) et la mise à jour en MDT (maintenir en mémoire les informations descriptives du monstre et les ajuster mentalement à chaque passage sur une carte action). Les capacités attentionnelles étaient également mobilisées. Le jeu pouvait être proposé dans une version simplifiée sans les cartes action ou de manière plus complexe en introduisant l'ensemble des cartes action. Une composante importante de la séance était la dimension motivationnelle. Le format ludique, la possibilité d'introduire une forme de compétition entre l'expérimentatrice et l'adolescent étaient des éléments centraux pour lui permettre de mobiliser ses fonctions exécutives, sans que cela ne lui paraisse trop coûteux. L'ajustement du niveau de difficulté était également nécessaire pour permettre à l'adolescent de se placer dans une position active et éviter un désinvestissement, dans le cas d'échecs à répétition. Enfin, une autre composante centrale était la métacognition. L'expérimentatrice questionnait l'adolescent tout au long du jeu afin de l'aider à identifier les stratégies de réponse mises en place et celles qui étaient les plus efficaces.

La séance se terminait par une phase de conclusion d'environ 5 minutes, durant laquelle l'adolescent passait les échelles d'évaluation décrites plus haut. Ce temps devait aussi permettre de discuter des difficultés rencontrées, pour valoriser les réussites et les progrès. Il permettait également de ritualiser le temps de clôture de la séance, supposé permettre de faciliter la réinsertion de l'adolescent dans la prochaine activité de son emploi du temps.

Évaluations post-entraînement

Les 6 tâches effectuées en début de protocole étaient à nouveau réalisées par l'ensemble des adolescents après les 12 semaines d'entraînement, entre le 3 et le 14 juillet 2023.

Analyse des données

Des analyses de faisabilité et d'efficacité ont été réalisées. Chez les 5 adolescents ayant bénéficié de l'entraînement, les analyses de faisabilité ont porté sur la moyenne de leurs réponses aux échelles d'évaluation pour les 3 dimensions (intérêt perçu, difficulté perçue, durée ressentie). Six temps d'analyse ont été définis : le temps 1 correspondant aux séances 1 à 6, le temps 2 aux séances 7 à 12, le temps 3 aux séances 13 à 18, le temps 4 aux séances 19 à 24, le temps 5 aux séances 25 à 30 et le temps 6 aux séances 31 à 36.

Concernant l'efficacité, compte tenu de la faible taille de l'échantillon et de l'importante hétérogénéité inter-individuelle, nous avons fait le choix de ne présenter que des statistiques descriptives en nous focalisant sur les changements individuels. Nous estimons comme cliniquement interprétable un changement de 20 %.

Résultats

Faisabilité du programme d'entraînement

Le premier élément important est un taux de participation globalement élevé, avec un minimum de 2 absences pour 36 séances (adolescent 3) et un maximum de 6 absences (adolescents 6 et 7). Le taux de participation moyen pour les 36 séances était de 86,7 %.

Intérêt perçu. Les scores étaient globalement très élevés avec en moyenne sur les 36 séances, 63,3 % de réponses des adolescents exprimant un degré d'intérêt moyen à fort (score de 4 à 5), pour seulement 15,6 % des réponses évoquant un intérêt moindre (score de 1 à 2). D'un point de vue dynamique, on retrouve un fort intérêt pour le programme chez les adolescents sur les temps 1, 2 et 6, une baisse d'intérêt aux temps 3 ou 4, sachant que ces deux derniers temps correspondaient à une période d'absentéisme plus importante due à la

vague de grippe, au retour des vacances scolaires (situé entre les temps 2 et 3) ou à la période des ponts du mois de mai (temps 3 et 4).

Difficulté perçue. Les adolescents ont globalement estimé la difficulté de la tâche sur les 36 séances comme facile (62,2 % des notes supérieures ou égales à 4), contre 21,1 % de réponses indiquant que la tâche était difficile (réponses inférieures ou égales à 2). D'un point de vue clinique, les adolescents considéraient un jeu facile comme étant systématiquement intéressant. Ils avaient plutôt tendance à surestimer leurs capacités et à ne pas pouvoir identifier lorsque la séance était difficile pour eux, comparativement au ressenti de l'expérimentatrice.

Durée ressentie. Majoritairement (65 %), les séances ont été perçues comme longues (réponses 1 à 2), avec seulement 20 % de réponses associées au ressenti d'une séance courte (réponses 4 à 5). Les adolescents ont eu tendance à associer une séance intéressante à une séance courte, et inversement.

Questionnaires à destination des professionnels. Les réponses des professionnels ont été relativement consensuelles. En effet, tous ont rapporté des difficultés pour intégrer un programme de ce type dans le fonctionnement de l'institution (modifier les emplois du temps, faire signer les consentements aux familles, trouver une salle disponible, intégrer l'expérimentatrice dans l'équipe). Néanmoins, ils ont montré un intérêt pour notre travail, visant à mieux accompagner les adolescents porteurs de TDIL, tout en expliquant avoir eu du mal à estimer les bénéfices à court terme pour eux.

Efficacité du programme d'entraînement.

Afin d'obtenir un indice commun entre les différentes tâches, nous avons calculé la différence relative entre les performances de chaque adolescent en condition pré et post entraînement. Quand cela est faisable, cette approche permet de standardiser et de rendre plus facilement interprétables les changements de performance à travers différentes conditions ou tâches. En exprimant ces changements par rapport à la performance de base (pré-entraînement), il est possible de comparer l'ampleur des changements entre les individus ou les groupes, indépendamment de leurs niveaux de performance initiaux. De plus, cela facilite l'identification des changements potentiellement significatifs de performance, notamment dans les cas où les différences absolues de scores bruts peuvent être difficiles à interpréter en raison de la variabilité des niveaux de performance de base. Enfin, cela permet de communiquer sur l'efficacité de l'intervention d'entraînement de manière facilement

compréhensible.

Le tableau 1 présente l'ensemble des résultats pour chaque adolescent. Nous pouvons noter une importante variabilité dans les changements de performance entre le pré- et le post-entraînement en fonction des tâches et des adolescents. Toutefois, concernant le groupe Entraînement, pour les trois tâches exécutives et la vitesse de traitement, tous les adolescents montrent une amélioration ou une stagnation de leurs performances, sauf l'adolescent 6 pour lequel la performance en vitesse de traitement diminue. Concernant l'estimation du temps, tous montrent une amélioration ou une stagnation de la performance, sauf les adolescents 3 et 4 pour qui la performance en précision dans la tâche de reproduction temporelle diminue. Concernant le groupe contrôle, deux adolescents (8 et 10) présentent une augmentation ou une stagnation de leurs performances dans l'ensemble des tâches. Les trois autres adolescents présentent des baisses de performances dans 1 à 3 tâches et une amélioration ou stagnation pour les autres tâches. Plus précisément, l'adolescent 5 montre une dégradation des ses performances pour 3 tâches et une stagnation pour les 3 autres. L'adolescent 1 montre à l'inverse une amélioration ou une stagnation de ses performances pour 4 tâches et une dégradation pour les 2 autres. Enfin, l'adolescent 2 montre une amélioration ou une stagnation de ses performances pour 5 tâches, et une dégradation pour 1 seule tâche.

Tâches [Pré-Post]		Mise à jour en MDT (score sur 24)	Flexibilité (coût de flexibilité en ms)	Inhibition (score d')	Vitesse de traitement de l'information (temps en ms)	Reproduction temporelle - (score de précision)	Reproduction temporelle (score de variabilité)
Adolescents							
Groupe entraînement	Adolescent 3	+54.55 % (11 ; 17)	+84.89 % (460 ; 70)	-17.98 % (2.93 ; 2.40)	+27.52 % (620 ; 449)	-21.43 % (0.40 ; 0.48)	+25.49 % (0.74 ; 0.55)
	Adolescent 4	+100.0 % (10 ; 20)	+47.94 % (807 ; 420)	-15.78 % (3.74 ; 3.15)	+9.69 % (534 ; 482)	-58.29 % (0.24 ; 0.38)	+38.41 % (1.26 ; 0.78)
	Adolescent 6	+61.54 % (13 ; 21)	+57.20 % (941 ; 403)	+56.15 % (2.51 ; 3.92)	-38.73 % (355 ; 493)	+71.72 % (-0.20 ; 0.06)	-18.03 % (0.37 ; 0.44)
	Adolescent 7	Donnée exclue	+27.11 % (639 ; 466)	+43.10 % (2.22 ; 3.17)	+19.81 % (490 ; 393)	+74.63 % (0.02 ; 0.005)	+8.47% (0.28 ; 0.26)
	Adolescent 9	+0 % (18 ; 18)	-0.68 % (736 ; 741)	+4.57 % (2.41 ; 2.52)	+15.2 % (594 ; 504)	+78.02 % (0.92 ; 0.20)	+23.78 % (0.47 ; 0.36)
Groupe contrôle	Adolescent 1	-64.29 % (14 ; 5)	+35.61 % (532 ; 342)	+139.88 % (1.54 ; 3.69)	-32.12 % (399 ; 528)	+24.07 % (-0.21 ; 0.16)	+11.25 % (0.72 ; 0.64)
	Adolescent 2	+5.88 % (17 ; 18)	+21.45 % (746 ; 586)	-11.81 % (4.64 ; 4.08)	-9.03 % (440 ; 480)	+59.24 % (-0.13 ; 0.05)	-59.45 % (0.30 ; 0.48)
	Adolescent 5	-40.0 % (5 ; 3)	+6.24 % (349 ; 327)	-17.81 % (2.63 ; 2.17)	-6.34 % (324 ; 344)	-21.87 % (-0.07 ; -0.08)	-42.35 % (0.27 ; 0.39)
	Adolescent 8	+100.0 % (7 ; 14)	+59.85 % (945 ; 379)	+28.59 % (3.60 ; 4.64)	+12.35 % (500 ; 438)	+89.5 % (0.20 ; 0.02)	-2.90 % (0.28 ; 0.29)
	Adolescent 10	+100.0 % (7 ; 14)	+4.65 % (623 ; 594)	+24.96 % (1.85 ; 2.32)	+18.70 % (511 ; 415)	+30.17 % (0.29 ; 0.20)	+26.51 % (0.95 ; 0.70)

Tableau 1. Pourcentages de variation entre les performances pré et post-test de chacun des 10 adolescents dans les 6 tâches cognitives. Les scores entre parenthèses représentent les performances en pré-test et post-test (pré ; post). Les augmentations de 20 % et + sont affichées en vert, les diminutions de 20 % et - en rouge, et les différences de moins de 20 % en gris. La donnée de MDT de l'Adolescent 7 a été exclue pour des raisons méthodologiques. Une valeur positive exprime une augmentation et une valeur négative une diminution des performances.

Discussion

L'objectif général de notre étude pilote était d'examiner à la fois la faisabilité d'un programme d'entraînement des fonctions cognitives chez des adolescents porteurs de TDIL idiopathique ainsi que son efficacité sur l'amélioration de leurs capacités d'estimation du temps et exécutives, avec l'ambition à terme de pouvoir fournir des pistes de réflexion et d'accompagnement aux professionnels de santé.

Faisabilité d'un entraînement cognitif

En termes de faisabilité, cette étude pilote montre dans un premier temps la difficulté à proposer un protocole d'entraînement à un échantillon important d'adolescents. Alors que ce travail a émergé sur la base d'une problématique de terrain, comme expliqué en introduction, peu d'établissements ont finalement donné leur accord pour participer à notre projet. Si on ajoute à cela le faible nombre d'adolescents correspondant aux critères d'inclusion et d'exclusion définis, cela révèle la complexité à mettre en place un tel programme auprès de cette population. Un autre point important est celui de l'intégration du protocole dans un fonctionnement institutionnel préexistant. En effet, cela implique l'adaptation de plusieurs emplois du temps, l'intégration de l'expérimentateur dans une équipe ayant déjà un fonctionnement établi, ainsi que des contraintes matérielles, comme celle de disposer d'un bureau accessible par exemple. Ces éléments sont également modulés par le facteur humain et plus précisément la capacité à créer avec les adolescents une alliance thérapeutique suffisante pour soutenir leurs progrès.

Concernant l'adhésion au projet, les adolescents se sont montrés enjoués et intéressés, comme en témoignent leurs réponses sur les échelles d'évaluation. Au regard du fort taux d'absentéisme habituel dans cet IME, celui observé lors de notre programme est relativement faible (moins de 14% sur l'ensemble des séances). Ceci étant dit, des fluctuations au niveau de l'intérêt perçu ont pu être observées ; celles-ci étant à mettre en lien notamment avec la période des vacances scolaires (entre les temps 2 et 3). Les relations interpersonnelles entre les adolescents ont également modulé leur intérêt, comme en témoignent des phénomènes de contagion sociale : lorsque l'un d'entre eux montrait son intérêt, les autres voulaient participer, et au contraire si l'un d'entre eux montrait une baisse d'intérêt, celle-ci avait tendance à se propager chez les autres enfants.

D'un point de vue clinique, les adolescents ont semblé bien investis dans le protocole.

L'existence d'un temps d'introduction et d'une phase de conclusion étaient propices à l'instauration d'une alliance thérapeutique efficace. Cela permettait également d'inscrire de manière précise le programme dans le temps. La durée des séances aurait difficilement pu être allongée en raison des fragilités attentionnelles des adolescents. Ceux-ci montraient parfois des signes de fatigue (agitation, bâillements) en fin de séance. Concernant la fréquence des séances par semaine, il n'était pas non plus envisageable de l'augmenter, compte tenu de l'implication d'une seule expérimentatrice dans le protocole et des emplois du temps chargés des adolescents. Enfin, l'équipe éducative de l'établissement a unanimement souligné l'intérêt capital d'un tel programme dans leur environnement, mettant en avant ses nombreux bénéfices potentiels. Toutefois, les professionnels ont également mis en lumière les défis pratiques liés à sa mise en œuvre, notamment en ce qui concerne l'aménagement des emplois du temps, la nécessité de recueillir l'accord des parents, le temps d'adaptation des jeunes au programme et les contraintes logistiques pour l'expérimentatrice dans son intégration au sein de l'équipe pédagogique. Une solution envisagée consiste à confier la responsabilité de cet entraînement à un membre du personnel de l'établissement, qui l'incorporerait ainsi à sa prise en charge habituelle, afin d'éviter une surcharge de travail. Cette approche permettrait une intégration plus fluide du programme dans le fonctionnement quotidien de l'établissement. Cependant, une telle proposition requiert une formation préalable des professionnels concernés, afin qu'ils puissent eux-mêmes proposer et superviser un entraînement de cette nature.

Efficacité d'un entraînement cognitif

Il est difficile de tirer une conclusion définitive quant à l'efficacité du programme. Malgré des limites inhérentes au type de protocole utilisé, à la taille de l'échantillon et à l'hétérogénéité des résultats, les analyses descriptives nous permettent toutefois de dégager des éléments de compréhension de son efficacité. Dans un premier temps, les résultats révèlent en pré-entraînement de nombreuses difficultés à la fois exécutives et d'estimation temporelle chez l'ensemble des adolescents porteurs de TDIL. Nous retrouvons notamment des niveaux de performance semblables à ceux obtenus dans des études antérieures utilisant les mêmes tâches (Gourlat et al., 2023, sous presse).

Lorsque l'on s'intéresse au groupe entraînement, on observe une « amélioration » assez générale des performances sur certaines tâches cognitives. Pouvant masquer des disparités qu'il ne faut pas éluder, cette amélioration apparaît plutôt homogène et marquée chez l'ensemble des adolescents concernant la mise à jour en MDT et la flexibilité. Cela

pourrait suggérer un réel effet bénéfique du programme sur ces capacités. Les conclusions sont plus nuancées concernant les capacités d'inhibition, de vitesse de traitement de l'information et d'estimation temporelle il existe des dégradations chez certains adolescents. Dans le groupe contrôle, les résultats sont plus variables d'un adolescent à un autre. Alors que trois adolescents montrent des diminutions ou stagnations de performance sur plusieurs tâches, deux adolescents montrent une amélioration ou une stagnation sur l'ensemble des six tâches. Ces résultats sont alors de nature à questionner la conclusion définitive d'un effet bénéfique du programme d'entraînement, puisque certains adolescents n'en ayant pas bénéficié ont tout de même montré de potentielles améliorations cognitives. Afin d'expliquer cette variabilité des résultats, il est possible de penser l'hétérogénéité des comportements (interindividuelle comme intra-individuelle) comme un patron spécifique au TDIL. En effet, dans une étude précédente utilisant les mêmes tâches (Gourlat et al., 2023) sur une population semblable, nous avons déjà observé des réponses très hétérogènes, notamment concernant la tâche de reproduction temporelle. On peut donc se demander si les déficits d'estimation du temps dans cette population ne se traduiraient pas par des réponses atypiques au caractère erratique.

La présente étude présente des points communs avec les travaux d'Orsolini et al. (2019) qui avaient proposé un entraînement cognitif de la MDT à 5 enfants et adolescents âgés de 9 à 12 ans porteurs de TDIL en utilisant des tâches informatisées stimulant plusieurs fonctions cognitives (attention, inhibition flexibilité, MDT et résolution de problème) et avec un étayage favorisant la motivation des adolescents au programme (pratique guidée par l'expérimentateur, verbalisation des stratégies, reformulation des questions, soutien dans la compréhension), contrairement aux entraînements présentés dans la méta-analyse de Danielsson et al. (2015) qui ne ciblaient que la mémoire de travail. Concernant les effets à court terme, on retrouve dans les deux études une amélioration des capacités de MDT, ainsi que des capacités attentionnelles dans les travaux d'Orsolini (2019). Cette dernière étude présente également une grande variabilité interindividuelle, certains enfants s'étant améliorés sur certaines tâches et pas d'autres après 8 semaines d'entraînement.

Pistes d'amélioration

La constitution des groupes, telle qu'elle a été faite, est perfectible. En effet, pour des raisons organisationnelles et de motivation des adolescents (F. P. Büchel & Paour, 2005b; Jaeggi et al., 2014), dont certaines ont déjà été évoquées précédemment, elle n'a pas pu être réalisée de manière aléatoire. Beaucoup d'adolescents de l'IME présentaient un taux

d'absentéisme relativement élevé dans l'établissement. Les enfants sélectionnés pour l'étude devaient donc être ceux dont le taux de présence était suffisant pour suivre l'intégralité du programme d'entraînement. De plus, le groupe entraînement a été constitué avec des adolescents dont les emplois du temps étaient compatibles, afin de permettre à une seule expérimentatrice de les voir chacun 3 fois par semaine, ce qui constituait un point crucial pour évaluer la faisabilité et l'efficacité du programme.

Une autre difficulté rencontrée a été d'accéder à un échantillon important d'adolescents correspondant aux critères d'inclusion et d'exclusion, ceci au sein d'un même établissement afin de limiter l'hétérogénéité des profils (âge, sévérité du TDI, étiologies variées) et de faciliter la mise en œuvre du protocole d'entraînement (sur le plan organisationnel). Une alternative pertinente pourrait être l'utilisation de la méthodologie Single Case Experimental Design (SCED, voir Krasny-Pacini & Evans, 2018; Tate et al., 2016). Ce schéma quasi-expérimental permet d'évaluer l'effet d'un entraînement sur un ou plusieurs individus sans constituer de groupe contrôle, puisque chaque individu constitue son propre sujet contrôle. L'intervention est randomisée et séquentielle et les performances de chaque individu sont mesurées de manière répétée et multiple tout au long du programme. Cette méthode présente de nombreux avantages dans une population telle que notre population cible : les personnes présentent des tableaux cognitifs et comportementaux complexes et hétérogènes. Elle permet également d'examiner plus finement, par la multiplication des évaluations, le degré de stabilité/instabilité des performances cognitives, indépendamment ou non de l'intervention.

Un dernier point de discussion relève du format des outils utilisés. Les adolescents ont montré une forte adhésion aux versions informatisées des tâches cognitives utilisées en évaluation pré- et post-entraînement. En effet, la dimension ludique de l'outil informatisé était notifiée par les adolescents qui réclamaient régulièrement de « refaire les jeux sur l'ordinateur ». Il a également été observé cliniquement que la mobilisation attentionnelle sur une durée de plus de 20 minutes était bien plus forte lorsque les tâches étaient informatisées. Cela paraît fortement lié à l'âge des adolescents, la période 11-14 ans correspondant à une période où leur intérêt pour le numérique est accru au quotidien (Mercklé & Octobre, 2012), aussi bien à l'IME que dans leurs centres d'intérêts plus personnels (premiers téléphones portables, apprentissage de l'utilisation de l'ordinateur, intérêt marqué pour les jeux vidéo). Ainsi, il apparaîtrait judicieux d'envisager de proposer un entraînement similaire avec des tâches informatisées avec un format ludique.

Conclusion

Nous avons donc mis en évidence plusieurs éléments allant dans le sens de la faisabilité d'un tel programme d'entraînement (taux de participation, taux d'adhérence au programme, intérêt perçu par les enfants et professionnels). Le choix d'un programme intensif sur une courte période semble être un format adapté aux personnes porteuses de TDIL. D'autre part, l'utilisation d'un format ludique, l'étayage par l'expérimentateur, l'adaptation du niveau de difficulté aux capacités de l'adolescent et le recours à des composantes métacognitives sont des éléments qui s'avèrent pertinents dans l'accompagnement du TDIL ; ce qui est cohérent avec la littérature présentée en introduction sur ce sujet.

En revanche, bien que nos données montrent qu'il est possible d'observer des améliorations cognitives à la suite d'un entraînement chez des adolescents porteurs de TDIL (modulo une forte variabilité intra et inter-individuelle), il est très difficile de conclure sur l'efficacité de cet entraînement. La forte variabilité inter-individuelle, aussi bien concernant le niveau initial de chaque enfant, que sa motivation ou son potentiel d'apprentissage, ne permet pas de définir un seuil d'amélioration commun à l'ensemble des adolescents. Il est donc nécessaire de considérer chaque participant individuellement et que des variations observées peuvent être dues à des fluctuations attentionnelles. D'autre part, les améliorations dans le groupe contrôle pourraient être dues à un effet test-retest qu'il faudrait contrôler. A ce titre, il peut apparaître plus pertinent dans ce contexte de se focaliser sur la significativité clinique que sur la significativité statistique. Plusieurs pistes d'amélioration peuvent être envisager. Dans un premier temps, l'impossibilité de proposer notre entraînement à un échantillon plus large avec une démarche individuelle n'a pas permis de caractériser précisément et pleinement son efficacité. Il est donc nécessaire de reproduire l'étude à plus grande échelle ou d'utiliser une méthodologie individuelle et clinique telle que le SCED, en envisageant éventuellement un format numérique pour le protocole d'entraînement. Ensuite, il serait judicieux d'intégrer le programme dans une prise en charge déjà existante. La mise en place d'un tel entraînement cognitif par un professionnel déjà intégré au sein de l'établissement permettrait de réduire les contraintes matérielles et organisationnelles et d'augmenter l'adhésion des adolescents et de l'équipe sur le long terme. Cette suggestion est d'autant plus pertinente qu'elle permettrait de proposer un accompagnement spécifique au profil de chaque enfant. Une seconde piste est la modulation de la durée du programme. En effet, il existe, en raison des fragilités cognitives, un temps d'adaptation relativement important chez les adolescents porteurs de TDIL. Ainsi, pourrait-il être judicieux de prolonger un programme de ce type pour en apprécier les effets. On pourrait également tester l'effet de stages intensifs de courte durée, répétés dans le temps, en ciblant des périodes

spécifiques afin de favoriser au maximum la motivation des adolescents qui apparaît fluctuante selon les périodes. Enfin, l'évaluation des bénéfices potentiels d'un programme doit être faite sur le long terme pour vérifier si la consolidation des acquis se fait ou si les effets ne sont que transitoires. Pour conclure, les résultats de ce programme fournissent ainsi des pistes intéressantes d'accompagnement des personnes porteuses de TDIL.

Références

- Albinet, C. T., Boucard, G., Bouquet, C. A., & Audiffren, M. (2012). Processing speed and executive functions in cognitive aging: How to disentangle their mutual relationship? *Brain and Cognition, 79*(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2012.02.001>
- APA. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders: DSM-5TM, 5th ed* (p. xliv, 947). American Psychiatric Publishing, Inc.
<https://doi.org/10.1176/appi.books.9780890425596>
- Büchel, F. P., & Paour, J.-L. (2005). Déficience intellectuelle : Déficits et remédiation cognitive. *Enfance, Vol. 57*(3), 227-240.
- Bussy, G., de Freminville, B., & Touraine, R. (2016). Rééducation cognitive de la déficience intellectuelle : Possibilités et limites. *ANAE : Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant, 141 vol 28*, 225-231.
- Chevalier, N. (2018). Willing to Think Hard? The Subjective Value of Cognitive Effort in Children. *Child Development, 89*(4), 1283-1295. <https://doi.org/10.1111/cdev.12805>
- Chevalier, N., Kelsey, K. M., Wiebe, S. A., & Espy, K. A. (2014). The Temporal Dynamic of Response Inhibition in Early Childhood: An ERP Study of Partial and Successful Inhibition. *Developmental Neuropsychology, 39*(8), 585-599.
<https://doi.org/10.1080/87565641.2014.973497>
- Danielsson, H., Zottarel, V., Palmqvist, L., & Lanfranchi, S. (2015). The effectiveness of working memory training with individuals with intellectual disabilities—A meta-analytic review. *Frontiers in Psychology, 6*, 1230.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01230>
- Droit-Volet, S., Wearden, J. H., & Zélanti, P. S. (2015). Cognitive abilities required in time judgment depending on the temporal tasks used: A comparison of children and adults. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 68*(11), 2216-2242.
<https://doi.org/10.1080/17470218.2015.1012087>
- Fidler, D. J., & Lanfranchi, S. (2022). Executive Function and Intellectual Disability: Innovations, Methods, and Treatment. *Journal of intellectual disability research: JIDR, 66*(1-2), 1-8. <https://doi.org/10.1111/jir.12906>
- Fourneret, P., & des Portes, V. (2017). Approche développementale des fonctions exécutives : Du bébé à l'adolescence. *Archives de Pédiatrie, 24*(1), 66-72.
<https://doi.org/10.1016/j.arcped.2016.10.003>
- Gourlat, E., Rattat, A.-C., & Albinet, C. T. (sous presse). Vers une meilleure compréhension

du trouble du développement intellectuel léger idiopathique : Des symptômes aux modalités d'accompagnement. *Psychologie Française*.

- Gourlat, E., Rattat, A.-C., Valéry, B., & Albinet, C. (2023). Deficits of Duration Estimation in Individuals aged 10 to 20 Years Old with Idiopathic Mild Intellectual Disability: The Role of Updating Working Memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*.
- Gravråkmø, S., Olsen, A., Lydersen, S., Ingul, J. M., Henry, L., & Øie, M. G. (2023). Associations between executive functions, intelligence and adaptive behaviour in children and adolescents with mild intellectual disability. *Journal of Intellectual Disabilities: JOID*, 27(3), 715-727. <https://doi.org/10.1177/17446295221095951>
- Inserm. (2016). *Déficiences intellectuelles*. Inserm - La science pour la santé. <https://www.inserm.fr/information-en-sante/expertises-collectives/deficiences-intellectuelles>
- Jaeggi, S. M., Buschkuhl, M., Shah, P., & Jonides, J. (2014). The role of individual differences in cognitive training and transfer. *Memory & Cognition*, 42(3), 464-480. <https://doi.org/10.3758/s13421-013-0364-z>
- Krasny-Pacini, A., & Evans, J. (2018). Single-case experimental designs to assess intervention effectiveness in rehabilitation: A practical guide. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 61(3), 164-179. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2017.12.002>
- Mercklé, P., & Octobre, S. (2012). La stratification sociale des pratiques numériques des adolescents. *RESET. Recherches en sciences sociales sur Internet*, 1, Article 1. <https://doi.org/10.4000/reset.129>
- Nouwens, P. J. G., Smulders, N. B. M., Embregts, P. J. C. M., & van Nieuwenhuizen, C. (2017). Meeting the support needs of persons with mild intellectual disability or borderline intellectual functioning: Still a long way to go. *Journal of Intellectual Disability Research: JIDR*, 61(12), 1104-1116. <https://doi.org/10.1111/jir.12427>
- Nouwens, P. J. G., Smulders, N. B. M., Embregts, P. J. C. M., & van Nieuwenhuizen, C. (2020). Differentiating care for persons with mild intellectual disability or borderline intellectual functioning: A Delphi study on the opinions of primary and professional caregivers and scientists. *BMC Psychiatry*, 20(1), 57. <https://doi.org/10.1186/s12888-020-2437-4>
- Ogden, R. S., Wearden, J. H., & Montgomery, C. (2014). The differential contribution of executive functions to temporal generalisation, reproduction and verbal estimation. *Acta Psychologica*, 152, 84-94. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2014.07.014>

- Orsolini, M., Melogno, S., Latini, N., Penge, R., & Conforti, S. (2015). Treating verbal working memory in a boy with intellectual disability. *Frontiers in Psychology, 6*, 1091. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01091>
- Orsolini, M., Melogno, S., Scalisi, T. G., Latini, N., Caira, S., Martini, A., & Federico, F. (2019). Training Verbal Working Memory in Children with Mild Intellectual Disabilities: Effects on Problem-solving: *Psicologia Educativa. Psicologia Educativa, 25*(1), 1-11. <https://doi.org/10.5093/psed2018a12>
- Rattat, A.-C., & Collié, I. (2020). *Duration judgments in children and adolescents with and without mild intellectual disability. 6*(11).
- Spaniol, M., & Danielsson, H. (2022). A meta-analysis of the executive function components inhibition, shifting, and attention in intellectual disabilities. *Journal of Intellectual Disability Research, 66*(1-2), 9-31. <https://doi.org/10.1111/jir.12878>
- Tanner, W., & Swets, J. (1954). The human use of information--I: Signal detection for the case of the signal known exactly. *Transactions of the IRE Professional Group on Information Theory, 4*(4), 213-221. <https://doi.org/10.1109/TIT.1954.1057461>
- Tate, R. L., Perdices, M., Rosenkoetter, U., Shadish, W., Vohra, S., Barlow, D. H., Horner, R., Kazdin, A., Kratochwill, T., McDonald, S., Sampson, M., Shamseer, L., Togher, L., Albin, R., Backman, C., Douglas, J., Evans, J. J., Gast, D., Manolov, R., ... Wilson, B. (2016). The Single-Case Reporting Guideline In BEhavioural Interventions (SCRIBE) 2016 Statement. *Physical Therapy, 96*(7), e1-e10. <https://doi.org/10.2522/ptj.2016.96.7.e1>
- Theodoraki, T. E., McGeown, S. P., Rhodes, S. M., & MacPherson, S. E. (2020). Developmental changes in executive functions during adolescence: A study of inhibition, shifting, and working memory. *The British Journal of Developmental Psychology, 38*(1), 74-89. <https://doi.org/10.1111/bjdp.12307>
- van der Molen, M. J. (2010). Working memory structure in 10- and 15-year-old children with mild to borderline intellectual, disabilities. *Research in Developmental Disabilities, 31*(6), 1258-1263. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2010.07.019>
- Zakay, D. (2012). Experiencing time in daily life. *Psychologist, 25*, 578-581.

Appendix

Liste des jeux supports de l'entraînement

- Set (Marsha Falco, Gigamic)
- Paniclab (Dominique Ehrhard, Gigamic)
- Trésors de dragons (Reiner Knizia, Oya)
- Tropicco (Cyril Blondel, Interlude-Cocktail Games)
- Saboteurs (Frédéric Moyersoen, Gigamic)
- Sushis dice (Henri Kermarrec, Sit Down, 2014)
- Rush hour (Nob Yoshigahra, Thinkfun)
- Metaform (Michel & Robert Lyons, Foxmind)
- Salade de cafards (Jacques Zeimet, Gigamic)
- Dobble émotionnel (MC en maternelle)
- La montagne de la confiance (Stéphanie Deslauriers & Isabelle Denis, Placote)
- La planète des émotions (Solène Bourque, Placote)
- L'école des monstres (Stéphanie Deslauriers & Solène Bourque, Placote)
- Jeu des Émotion (Maëlle Challan Belval, Comitys)
- Jeu des Émotion (Maëlle Challan Belval, Comitys)

Questionnaires de satisfaction à destination des enfants

QUESTIONS	1	2	3	4	5
Intérêt pour la séance	« pas d'intérêt »	« peu d'intérêt »	« ni l'un ni l'autre »	« moyennement d'intérêt »	« beaucoup d'intérêt »
Difficulté estimée	« très difficile »	« un peu difficile »	« ni l'un ni l'autre »	« plutôt facile »	« très facile »
Durée ressentie	« séance très longue »	« séance un peu longue »	« ni l'un ni l'autre »	« séance plutôt courte »	« séance très courte »

Questionnaire de satisfaction à destination des professionnels

QUESTIONNAIRE DE SATISFACTION	
1.	De manière générale, les enfants ont-ils adhéré au programme ? Les enfants ont-ils manifesté de l'intérêt à participer au programme ? Ou au contraire montraient-ils du désintérêt, de la réticence à suivre les séances ? Y avait-il beaucoup d'absences ?
2.	De manière générale l'équipe professionnelle a-t-elle adhéré au programme ? Les éducateurs et professionnels étaient-ils favorables à la mise en place de l'entraînement, montraient-ils de l'intérêt pour le programme ? Ou au contraire montraient-ils du désintérêt, ou de la réticence à suivre les séances ?
3.	Pouvez-vous lister les effets positifs du programme sur les jeunes (sur le plan cognitif et comportemental) ?
4.	Pouvez-vous lister les effets positifs du programme sur l'établissement ?
5.	Pouvez-vous lister les contraintes liées à la mise en place du programme (sur les jeunes sur le plan cognitif et comportemental) ?
6.	Pouvez-vous lister les contraintes liées à la mise en place du programme sur l'établissement notamment d'un point de vue organisationnel (matériel, emploi du temps, etc...) ?
7.	De manière générale trouvez-vous que le programme s'est bien intégré dans le fonctionnement de l'établissement ? Pourquoi ?
8.	Pensez-vous qu'il aurait été mieux que l'un des membres de l'équipe propose le programme dans le cadre d'une prise en charge déjà existante ? Pourquoi ?
9.	De manière plus globale qu'avez-vous pensé du programme ? Êtes-vous favorable à la mise en place d'un tel entraînement ? Pourquoi ?
10.	Avez-vous des suggestions/pistes d'améliorations ?

Emploi du temps des séances de l'entraînement cognitif

HORAIRES	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	 VENDREDI
9h-9h30	Sujet 3		Sujet 4	Sujet 9	Sujet 3
10h15-10h45	Sujet 4	Sujet 7			Sujet 7
12h30-13h00		Sujet 9	Sujet 6	Sujet 3	Sujet 9
13h-13h30	Sujet 6	Sujet 4	Sujet 7	Sujet 6	

2.2 Synthèse et analyses complémentaires

L'Étude 2 a proposé une analyse des conditions de faisabilité et d'efficacité d'un entraînement cognitif chez des adolescents porteurs d'un TDIL idiopathique âgés de 11 à 14 ans. Cette section vise à proposer une analyse supplémentaire des données n'ayant pas pu être incluses dans l'Article 4. En effet, ce travail empirique présente les résultats des participants aux évaluations pré- et post-entraînement sur 5 tâches cognitives évaluant l'inhibition, la flexibilité, la mise à jour en MDT, la VTI et l'estimation des durées (issues de l'Étude 1). Or, des tests papier-crayon évaluant l'attention soutenue, la reconnaissance des émotions et le potentiel d'apprentissage ont été proposés aux adolescents, ainsi qu'un questionnaire évaluant le fonctionnement exécutif aux éducateurs et professionnels de santé (BRIEF, Roy et al., 2014). L'objectif était d'une part, de vérifier si d'autres composantes cognitives mobilisant des composantes affectives et émotionnelles pouvaient être influencées par l'entraînement cognitif et d'autre part, dans une démarche clinique, de fournir des informations issues de l'appréciation des éducateurs et professionnels de santé. Enfin, l'utilisation du questionnaire de la BRIEF est également une approche permettant de pallier aux difficultés de mesure des FE évoquées précédemment dans le Chapitre 3 (p.73).

En effet, certains auteurs distinguent les FE qui seraient en lien avec la logique sans état émotionnel associé (FE « froides ») et celles qui, au contraire, feraient appel à des composantes affectives, émotionnelles et motivationnelles (FE « chaudes ») (Bechara et al., 2000; Zelazo & Müller, 2002). Tandis que les premières regrouperaient les processus cognitifs décrits par Diamond (2013) (inhibition, flexibilité, mise à jour en MDT, planification), les secondes impliqueraient des processus de prise de décision ou encore d'autorégulation (e.g. Roy & Lancelot, 2013). Cette dissociation serait en lien avec la sollicitation de réseaux cérébraux différents : les régions préfrontales dorsolatérales pour les FE dites « froides » et les régions préfrontales orbitaires et ventro-médianes pour les FE dites « chaudes » (Zelazo & Müller, 2002). Au regard de cette littérature, l'entraînement cognitif que nous avons proposé était constitué de séances mobilisant à la fois des composantes dites « chaudes » et des composantes dites « froides ».

Ainsi, cette section cherchera à déterminer (1) si les données issues du questionnaire standardisé mettent en évidence des difficultés exécutives chez les individus porteurs d'un TDIL par rapport à des individus TV, et si ces résultats sont cohérents avec les résultats aux tâches cognitives, et (2) si les performances aux tests papier-crayon (attention soutenue et

reconnaissance des émotions) se sont améliorées chez les participants ayant bénéficié de l'entraînement.

2.2.1 Analyses des données de la BRIEF

Nous avons dans un premier temps comparé les performances des adolescents porteurs d'un TDIL au questionnaire de la BRIEF évaluant le comportement exécutif au quotidien qui a été complété par les éducateurs et professionnels de santé accompagnant ces adolescents à une seule reprise. Les performances des adolescents porteurs d'un TDIL ont été comparées aux normes d'adolescents du même âge, afin de voir si le TDIL est associé à un retard des FE.

Le Tableau 5 présente les résultats des 10 adolescents au questionnaire en fonction des 8 aspects exécutifs évalués (inhibition, flexibilité, contrôle émotionnel, initiation, mémoire de travail, planification, organisation et contrôle attentionnel). Le score de régulation comportementale correspond à la moyenne des 3 premiers aspects exécutifs, le score de métacognition correspond à la moyenne des 5 derniers aspects exécutifs, et le score composite correspond à la moyenne des 8 aspects exécutifs et reflète ainsi le fonctionnement exécutif général. Les données mettent en évidence que 32 % des performances des 10 adolescents porteurs d'un TDIL sont dans la norme (T-score en dessous de 50), 35 % de leurs performances sont déficitaires (T-score supérieurs à 65), et 33 % sont limites (T-score compris entre 50 et 65) comparativement à des adolescents TV appariés sur l'AC. On observe que les performances des filles sont supérieures à celles des garçons avec 53 % de performances déficitaires chez les garçons contre seulement 18 % chez les filles. Il existe également davantage de performances déficitaires dans le groupe contrôle (51 %) que dans le groupe entraînement (20 %). Enfin, si on s'intéresse à chaque adolescent de manière individuelle, il semble que les adolescents 1, 5, 7 et 10 présentent davantage de performances déficitaires que les autres (entre 55 et 91 %), et que les adolescents 2, 8 et 4 présentent davantage de performances adaptées que les autres (entre 55 et 82 %). Les adolescents 3 et 6 présentent quant à eux des profils assez hétérogènes.

En faisant le parallèle avec les résultats obtenus aux tâches cognitives, on constate que pour la MDT, les adolescents dont les performances ont diminué entre le pré- et le post-entraînement (adolescents 1 et 5) ont des performances déficitaires à la BRIEF (dimension MDT). Cela suggère que les adolescents dont les performances sont moins bonnes à la BRIEF ont moins bénéficié de l'entraînement pour la MDT. Pour l'inhibition et la flexibilité, aucune dégradation de plus de 20% n'est observé quel que soit le groupe.

Les adolescents du groupe entraînement dont les performances ont stagné entre le pré- et le post-entraînement, obtiennent des performances à la BRIEF qui sont dans la norme ou limite. Cela suggère que les adolescents ayant moins bénéficié de l'entraînement présentaient déjà des performances adaptées ou pas totalement déficitaires à la BRIEF. En revanche, pour les adolescents du groupe entraînement dont les performances se sont améliorées entre le pré- et le post-entraînement, les résultats sont hétérogènes. Pour le groupe contrôle, les résultats sont également très hétérogènes et ne nous permettent pas de tirer de conclusion claire.

En somme, ces données suggèrent que certains adolescents pourraient davantage bénéficier de l'entraînement que d'autres sur la base de l'évaluation des fonctions exécutives et de la VTI. Ainsi, il est possible que pour certains adolescents la stimulation cognitive des prises en charge habituelles soit suffisante, ce qui est moins le cas pour d'autres. Il semble également que certains adolescents ne bénéficient ni de l'entraînement ni de ces prises en charge habituelles. Cela amène également à se demander s'il serait possible d'identifier au préalable les individus qui pourraient davantage bénéficier d'un entraînement cognitif. Ce point sera discuté dans la section 3 de la Discussion.

Tableau 5 : Scores bruts avec entre parenthèses T-scores et rangs percentiles au questionnaire de la BRIEF
RC : Régulation comportementale ; M : Métacognition ; ; SC : Score composite NE : Négativité émotionnelle ; RE : Régulation émotionnelle ; NTOM : version sans théorie de l'esprit ; TOM : version avec théorie de l'esprit.

Questionnaires		BRIEF Régulation comportementale	BRIEF Métacognition	BRIEF Score composite	BRIEF Inhibition	BRIEF Flexibilité	BRIEF Contrôle émotionnel	BRIEF Initiation	BRIEF Mémoire de travail	BRIEF Planification	BRIEF Organisation	BRIEF Contrôle attentionnel
Adolescents	Adolescent 3 (F)	43 (54 ; 71)	70 (52 ; 62)	113 (53 ; 67)	10 (39 ; 13)	15 (64 ; 91)	18 (59 ; 83)	15 (59 ; 87)	17 (57 ; 81)	20 (56 ; 80)	7 (38 ; 17)	11 (44 ; 38)
	Adolescent 4 (G)	49 (63 ; 89)	61 (44 ; 34)	110 (51 ; 61)	20 (69 ; 95)	14 (62 ; 90)	15 (53 ; 70)	11 (46 ; 47)	14 (49 ; 62)	17 (48 ; 54)	9 (44 ; 37)	10 (38 ; 17)
	Adolescent 6 (G)	57 (74 ; 97)	68 (49 ; 52)	125 (58 ; 82)	18 (62 ; 90)	16 (69 ; 97)	23 (76 ; 99)	11 (46 ; 47)	12 (44 ; 38)	18 (50 ; 62)	11 (50 ; 58)	16 (55 ; 76)
	Adolescent 7 (G)	42 (54 ; 72)	97 (68 ; 95)	139 (65 ; 92)	14 (50 ; 63)	15 (66 ; 94)	13 (47 ; 55)	20 (75 ; 99)	25 (77 ; 98)	27 (69 ; 95)	9 (44 ; 37)	16 (55 ; 76)
	Adolescent 9 (F)	34 (43 ; 30)	85 (62 ; 88)	119 (56 ; 74)	10 (39 ; 13)	13 (56 ; 78)	11 (40 ; 23)	19 (73 ; 98)	20 (64 ; 92)	22 (60 ; 87)	8 (41 ; 27)	16 (60 ; 89)
	Moyenne groupe entraînement	55	76.2	141	14.4	14.6	16	15.2	17.6	20.8	8.8	13.8
	Groupe contrôle	Adolescent 1 (G)	69 (90 ; 99)	96 (68 ; 95)	165 (78 ; 99)	24 (81 ; 99)	17 (73 ; 99)	28 (90 ; 99)	15 (59 ; 83)	21 (67 ; 95)	27 (69 ; 95)	12 (53 ; 66)
Adolescent 2 (F)		33 (42 ; 26)	61 (46 ; 41)	94 (44 ; 34)	10 (39 ; 13)	13 (56 ; 78)	10 (37 ; 10)	15 (59 ; 87)	14 (50 ; 62)	16 (48 ; 55)	6 (35 ; 12)	10 (40 ; 26)
Adolescent 5 (G)		60 (78 ; 99)	131 (91 ; 99)	191 (91 ; 99)	26 (87 ; 99)	15 (66 ; 94)	19 (64 ; 90)	24 (89 ; 99)	30 (91 ; 99)	35 (86 ; 99)	18 (71 ; 99)	24 (78 ; 99)
Adolescent 8 (F)		38 (48 ; 51)	56 (42 ; 27)	94 (44 ; 34)	11 (42 ; 33)	13 (56 ; 78)	14 (48 ; 53)	9 (40 ; 22)	14 (50 ; 62)	15 (45 ; 47)	7 (38 ; 17)	11 (44 ; 38)
Adolescent 10 (F)		58 (72 ; 98)	102 (73 ; 98)	160 (75 ; 98)	23 (79 ; 99)	14 (60 ; 88)	21 (67 ; 95)	18 (69 ; 98)	24 (74 ; 97)	28 (73 ; 97)	12 (53 ; 67)	20 (73 ; 98)
Moyenne groupe contrôle		51.6	89.2	141	18.8	14.4	18.4	16.2	20.6	24.2	11	17.2

Les scores dans la norme sont affichés en vert, les scores dans la limite en orange et les scores pathologiques en rouge. Pour la BRIEF, les T-score compris entre 0 et 50 sont considérés comme adaptés, entre 50 et 65 comme limites et les T-scores supérieurs ou égaux à 65 sont considérés comme déficitaires

2.2.2. Analyses des données aux tests papier-crayon

Nous avons ensuite examiné les performances au test d'attention soutenue (subtest Coups de fusil de la TEA-Ch) et de reconnaissance des émotions (subtest Reconnaissance d'Affect de la NEPSY II) des adolescents porteurs d'un TDIL et nous les avons comparées aux normes (Tableau 6). Les résultats mettent en évidence des performances déficitaires à la TEA-Ch aussi bien en condition pré-entraînement qu'en condition post-entraînement pour l'ensemble des 10 adolescents. Pour le subtest évaluant la reconnaissance des émotions, les performances sont globalement déficitaires en condition pré-entraînement, à l'exception des adolescents 3 et 8 dont les performances sont limites (notes standards à 7/19). En condition post-entraînement, les performances sont globalement à la limite du déficit (notes standards entre 7 et 8/19), à l'exception des adolescents 6 et 7 qui ont des performances dans la norme (notes standards supérieures ou égales à 9/19) et des adolescents 1 et 10 dont les performances sont déficitaires (notes standards inférieures ou égales à 6/19). Si l'on s'intéresse au pourcentage d'amélioration entre les deux conditions, on observe globalement une amélioration d'au moins 20 % pour les 2 subtests chez tous les adolescents du groupe entraînement, à l'exception de l'adolescent 3 dont les performances à la TEA-Ch stagnent et dont la donnée à la NEPSY II a été exclue¹. Dans le groupe contrôle, toutes les performances ont stagné à l'exception de celles de l'adolescent 1 qui se sont dégradées aux 2 subtests, celles de l'adolescent 2 qui se sont améliorées en reconnaissance des émotions et celles de l'adolescent 5 qui se sont améliorées en attention soutenue.

Ainsi, bien que les performances en attention soutenue soient déficitaires pour l'ensemble des adolescents en pré et post-entraînement, il existe une amélioration d'au moins 33 % chez 4 participants du groupe entraînement contre seulement 1 dans le groupe contrôle. Concernant la reconnaissance des émotions, les performances sont déficitaires chez 8 adolescents sur 10 en condition pré-entraînement et seulement 2 adolescents (du groupe contrôle) en condition post-entraînement. Dans le groupe entraînement, 4 participants ont bénéficié d'une amélioration de leurs performances cognitives d'au moins 18 %, contre 1 seul dans le groupe contrôle. Ces données suggèrent donc que l'entraînement proposé pourrait avoir amélioré les capacités d'attention soutenue et de reconnaissance des émotions. Les améliorations observées dans le groupe contrôle suggèrent que les adolescents concernés pourraient déjà bénéficier des stimulations de leurs prises en charge quotidiennes.

¹ La donnée post-test du participant est aberrante au regard des observations cliniques.

Tableau 6 : Scores obtenus aux tâches d'attention soutenue (TEA-Ch) et de reconnaissance des émotions (NEPSY II)

Notes brutes à la TEA-Ch pour le pré et le post-entraînement (score sur 10) avec entre parenthèses le rang percentile, Pourcentage d'amélioration relatif entre les scores pré et post-entraînement à la TEA-Ch avec entre parenthèse les données pré et post-entraînement, Notes brutes à la NEPSY II pour le pré et le post-entraînement (score sur 35) avec entre parenthèses la note standard (score sur 19), Pourcentage d'amélioration relatif entre les scores pré et post-entraînement à la NEPSY II avec entre parenthèse les données pré et post-entraînement.

Scores aux tâches		Note brute à la TEA-Ch pré-entraînement sur 10 (rang percentile)	Note brute à la TEA-Ch post-entraînement sur 10 (rang percentile)	Pourcentage d'amélioration à la TEA-Ch (note pré ; post)	Note brute à la NEPSY pré-entraînement sur 35 (note standard)	Note brute à la NEPSY post-entraînement sur 35 (note standard)	Pourcentage d'amélioration à la NEPSY (note pré ; post)
Adolescents	Adolescent 3 (F)	0 (< Percentile 0,2)	2 (< Percentile 0,2)	Donnée exclue (0 ; 2)	24 (7/19)	25 (7/19)	+4.17 % (24 ; 25)
	Adolescent 4 (G)	3 (< Percentile 0,2)	4 (Percentile 0,2-0,6)	+33.33 % (3 ; 4)	22 (6/19)	27 (8/19)	+22.72 % (22 ; 27)
	Adolescent 6 (G)	3 (< Percentile 0,2)	5 (Percentile 0,2-0,6)	+66.67 % (3 ; 5)	23 (6/19)	28 (9/19)	+21.74 % (23 ; 28)
	Adolescent 7 (G)	2 (< Percentile 0,2)	4 (Percentile 0,2-0,6)	+100.0 % (2 ; 4)	23 (6/19)	29 (10/19)	+26.09 % (23 ; 29)
	Adolescent 9 (F)	2 (< Percentile 0,2)	4 (< Percentile 0,2)	+100.0 % (2 ; 4)	22 (6/19)	27 (8/19)	+22.72 % (22 ; 27)
	Moyenne groupe entraînement	2	3.8		22.8	27.2	
Groupe entraînement	Adolescent 1 (G)	3 (< Percentile 0,2)	1 (< Percentile 0,2)	-66.67 % (3 ; 1)	18 (4/19)	15 (2/19)	-16.67 % (18 ; 15)
	Adolescent 2 (F)	3 (< Percentile 0,2)	4 (< Percentile 0,2)	+33.33 % (3 ; 4)	23 (6/19)	25 (7/19)	+8.70 % (23 ; 25)
	Adolescent 5 (G)	2 (< Percentile 0,2)	2 (< Percentile 0,2)	0 % (2 ; 2)	22 (6/19)	26 (8/19)	+ 18.18 % (22 ; 26)
	Adolescent 8 (F)	2 (< Percentile 0,2)	2 (< Percentile 0,2)	0 % (2 ; 2)	24 (7/19)	24 (7/19)	0 % (24 ; 24)
	Adolescent 10 (F)	0 (< Percentile 0,2)	0 (< Percentile 0,2)	0 % (0 ; 0)	19 (4/19)	20 (5/19)	+5.26 % (19 ; 20)
	Moyenne groupe contrôle	2	1.8		21.2	22	

Pour les pourcentages d'amélioration relatifs : les augmentations de 10% et + sont affichées en vert, les diminutions de 10% et + en rouge, et les différences de moins de 10% en gris
La donnée de MDT de l'adolescent 7 a été exclue pour des raisons méthodologiques (cases gris foncé). Pour les notes brutes : les notes en dessous de la norme sont indiquées en rouge, les notes considérées limites (entre 7 et 8/19 à la NEPSY) en orange, et les notes dans la norme en vert.

A retenir

- Malgré l'hétérogénéité des résultats des participants au questionnaire de la BRIEF, les données semblent indiquer que les participants du groupe contrôle présentent davantage de performances déficitaires que le groupe entraînement. Les participants ayant le moins bénéficié de l'entraînement présentaient des performances dans la norme ou à la limite à la BRIEF.
- Les performances d'attention soutenue au subtest de la TEA-Ch sont déficitaires pour l'ensemble des participants en pré comme en post-entraînement. Néanmoins, le pourcentage d'amélioration est plus élevé chez les participants du groupe entraînement.
- Les performances de reconnaissance des émotions au subtest de la NEPSY II sont globalement déficitaires ou limites pour tous les participants en pré-entraînement et deviennent dans la norme ou limite pour la plupart d'entre eux en post-entraînement. Le pourcentage d'amélioration est plus élevé chez les participants du groupe entraînement comparativement au groupe contrôle.

Conclusion

Les résultats de l'Étude 2 montrent qu'il est possible de proposer un entraînement spécifique à des adolescents porteurs de TDIL dans des instituts médico-éducatifs. En raison de la forte hétérogénéité des résultats, les données de notre étude ne permettent pas de conclure sur l'efficacité d'un tel entraînement sur les fonctions cognitives dans le TDIL. Les futurs travaux doivent s'intéresser à une méthodologie d'analyse individuelle pour tenir compte de la variabilité interindividuelle de cette population spécifique. Les analyses complémentaires suggèrent l'importance de d'autres fonctions cognitives que celles étudiées dans ce travail de thèse, telles que l'attention soutenue ou la reconnaissance des émotions. Les données de la BRIEF fournissent également davantage d'informations sur l'implication des fonctions cognitives et l'impact sur le quotidien des individus porteurs de TDIL. Elles semblent indiquer que certains sous-groupes pourraient davantage bénéficier des effets d'un tel entraînement. En conséquence, les futurs travaux doivent d'une part investiguer le rôle de d'autres fonctions cognitives que les FE et la VTI dans les difficultés d'estimation des durées dans le TDIL et d'autre part, utiliser des questionnaires ou des entretiens cliniques en compléments des tests cognitifs pour permettre une analyse plus fine de ces fonctions.

Discussion générale

Le premier objectif de ce travail de thèse était de mettre en évidence l'existence de difficultés d'estimation des durées chez des enfants et adolescents porteurs d'un TDIL, et d'examiner dans quelle mesure ces difficultés reflètent un trouble du traitement de l'information temporelle en soi, ou bien sont expliquées par d'autres difficultés cognitives, notamment exécutives et de VTI. Le second objectif était d'examiner si un entraînement cognitif pouvait améliorer les FE, la VTI et les capacités d'estimation des durées dans cette population spécifique.

L'ensemble des résultats de nos deux études, ainsi que les questionnements qui en découlent, seront discutés ici en 3 points. Nous aborderons dans un premier temps les difficultés cognitives observées chez les individus porteurs d'un TDIL en essayant de déterminer si celles-ci révèlent l'existence d'un retard développemental ou bien plutôt d'un déficit non rattrapé à l'âge adulte. Dans un second temps, nous ferons la synthèse des fonctions cognitives requises dans l'estimation des durées et des implications de ces liens dans la compréhension des difficultés d'estimation des durées chez les enfants et adolescents porteurs d'un TDIL. Enfin, nous discuterons de la possibilité d'entraîner les fonctions cognitives chez des adolescents porteurs d'un TDIL, aussi bien en termes de faisabilité que d'efficacité.

1. Les difficultés cognitives associées au TDIL traduisent-elles un retard développemental qui sera rattrapé à l'âge adulte ou bien un déficit ?

1.1 L'hypothèse du retard versus déficit

Le présent travail de thèse aspirait à mettre en évidence l'existence de difficultés d'estimation des durées dans le TDIL. Nos données suggèrent effectivement que les individus porteurs d'un TDIL présentent des difficultés d'estimation des durées, comparativement à des individus appariés sur l'AC, et que ces difficultés seraient en lien avec d'autres difficultés cognitives notamment au niveau des FE et de la VTI. Une première question qui émerge à la suite de ce travail est la suivante : les difficultés cognitives observées dans le TDIL reflètent-elles un retard développemental ou bien un déficit non rattrapé à l'âge adulte ? Dans la littérature sur le TDI, les auteurs distinguent une approche développementale selon laquelle les enfants porteurs d'un TDI présenteraient une courbe développementale comparable à celles

d'enfants typiques qui serait décalée dans le temps, et une approche déficitaire qui considère que le TDI serait associé à un certain nombre de déficits cognitifs non rattrapés à l'âge adulte (pour une revue, voir Courbois, 2016).

Les résultats de notre première étude révèlent des performances d'estimation des durées, d'inhibition, de flexibilité, de mise à jour en MDT et de VTI chez les individus porteurs d'un TDIL systématiquement inférieures à celles des participants TV appariés sur l'AC (à l'exception de la tâche d'inhibition ARTS), et ce quel que soit le groupe d'âge. Concernant l'aspect développemental, nos résultats divergent d'une tâche à l'autre. On retrouve une amélioration des performances avec l'âge dans les tâches GNG (inhibition), WCST (flexibilité), CRT (vitesse de traitement), reproduction temporelle (variabilité uniquement), bissection temporelle, ainsi que dans les trois tâches de mise à jour en MDT (empan dynamique verbal, spatial et 2-back). En revanche, quel que soit le groupe, aucune évolution des performances avec l'âge n'a été observée pour les tâches de CTS et ARTS (flexibilité) ainsi que le MIT et le RAST (inhibition), tout comme sur la précision pour la tâche de reproduction temporelle. La question du retard développemental ou du déficit sera abordée séparément pour chaque fonction cognitive dans les paragraphes qui suivent. Néanmoins, l'ensemble de nos résultats synthétisés ci-dessous ne permettent pas de statuer définitivement sur cette question sans des analyses supplémentaires incluant un groupe d'enfants de moins de 7 ans et un groupe d'adultes de plus de 20 ans. C'est en effet le seul moyen pour déterminer si les différences observées dans nos études persistent à l'âge adulte (dans ce cas l'hypothèse du déficit est validée) ou bien si celles-ci disparaissent (dans ce cas l'hypothèse du retard est validée). Un ou plusieurs groupe(s) de participants plus âgés n'a(ont) pas pu être inclus dans le présent protocole en grande partie pour des raisons de faisabilité, notamment liées au recrutement. En effet, le recrutement de nos participants s'est effectué dans des structures médico-éducatives qui accueillent des enfants et adolescents uniquement jusqu'à leurs 20 ans. Constituer un échantillon de personnes majeures porteurs d'un TDIL s'avère donc encore plus complexe, et cela implique davantage de variabilité dans la mesure car aucune d'elles n'a une expérience, un parcours et des stimulations différentes dans sa vie quotidienne. Les données d'enfants âgés de moins de 7 ans doivent également être incluses pour quantifier l'ampleur du retard dans les groupes d'enfants porteurs d'un TDIL âgés de 10 à 12 ans pour lesquels les performances sont inférieures à celles des enfants TV de même âge chronologique.

1.1.1 L'estimation des durées

Concernant l'estimation des durées, on observe un retard qui s'amplifie avec l'âge pour la variabilité des reproductions, allant jusqu'à environ 11 ans chez les enfants porteurs d'un TDIL âgés de 17 à 20 ans. En revanche, aucun retard n'est observé dans la précision des reproductions temporelles. Pour la tâche de bissection temporelle, bien que l'utilisation d'une variable intra-participants ne nous permette pas de comparer les performances de chaque groupe deux à deux, nos données (effet de groupe et d'âge, couplé à l'analyse descriptive des courbes de bissection) semblent indiquer que les performances s'améliorent avec l'âge. Les données de notre étude révèlent également une augmentation de la variabilité des reproductions des durées entre 12 et 20 ans chez les individus TV. Or, dans le développement typique, la littérature met en évidence des performances d'estimation de durées comparables à celles d'adultes autour de 8 ans (e.g., Droit-Volet et al., 2001, 2007). Cela signifie soit que les performances d'estimation du temps augmentent après 8 ans, soit qu'il existe des disparités dans les performances en fonction du type de tâche utilisée. Chez les individus porteurs d'un TDIL, nos résultats sont comparables avec la littérature qui mettait en évidence amélioration de la sensibilité temporelle entre 11 et 19 ans (Rattat & Collié, 2020) suggérant un retard de développement compris entre 8 et 11 ans. L'augmentation de l'ampleur du retard avec l'âge est un argument plutôt en faveur de l'hypothèse du déficit, même si celle-ci reste à confirmer avec des études supplémentaires comme expliqué précédemment. En effet, dans le cas d'un retard, on s'attendrait plutôt observer une diminution progressive de l'ampleur de ce retard avec l'âge, laissant présager qu'il serait rattrapé à un âge ultérieur. De plus, le fait que tous les individus porteurs d'un TDIL, quel que soit leur âge, soient plus variables dans leurs reproductions de durées que leurs pairs TV, tout en étant aussi précis qu'eux (pas de différence sur la précision des reproductions de durées), pourrait de la même manière être un argument en faveur de l'hypothèse d'un déficit.

1.1.2 L'inhibition

Les performances à la tâche de GNG augmentent de manière significative avec l'âge entre 10 et 16 ans chez les individus porteurs d'un TDIL, tandis qu'elles augmentent entre 13 et 20 ans chez les individus TV. Or, la littérature sur le développement typique indique que les capacités d'inhibition se développeraient dès les premiers mois de vie, avec un pic d'amélioration (forte amélioration rapide) durant l'âge préscolaire, puis une amélioration

continue jusqu'à environ 17 ans (pour des revues, voir Best & Miller, 2010; Chevalier, 2010; Diamond, 2013; Fourneret & des Portes, 2017). En cohérence avec ces données développementales, nous avons bien observé une amélioration des performances des enfants TV entre 7-9 ans et 10-12 ans, mais pas entre 10-12 ans et 13-16 ans. Il est possible que la manière dont nous avons constitué nos groupes d'âge ne permette pas d'observer cette amélioration attendue. Une analyse des performances avec l'âge comme variable continue (plutôt que la constitution de groupes d'âge) pourrait permettre de vérifier l'existence d'amélioration continue des performances d'inhibition entre 10 et 16 ans. Concernant la question du retard versus déficit, nous avons mis en évidence, uniquement avec la tâche GNG, que le retard des individus porteurs d'un TDIL comparativement aux individus TV augmente avec l'âge. Plus précisément, ce retard est d'au moins 3 ans chez les plus jeunes de 10-12 ans, puis augmente jusqu'à 7 ans à l'âge de 13 à 16 ans, pour atteindre 11 ans chez les plus âgés de 17-20 ans. Ces données sont compatibles avec les études qui mettent en évidence des difficultés d'inhibition aussi bien chez des enfants dès l'âge de 4 ans que des jeunes adultes jusqu'à l'âge de 23 ans (Danielsson et al., 2012; Van der Molen et al., 2007, 2009; Zagaria et al., 2021). De la même manière que pour l'estimation des durées, l'amplification du retard avec l'âge, non rattrapé à 20 ans, chez les individus porteurs d'un TDIL plaide plutôt en faveur de l'hypothèse d'un déficit des capacités d'inhibition, bien que cela reste à confirmer avec des études complémentaires auprès d'individus plus âgés comme expliqué précédemment. Il est important de limiter la portée de nos conclusions ici puisqu'elles ne reposent que sur les performances à la tâche GNG. En effet, les performances aux 2 autres tâches d'inhibition (RAST et MIT) n'évoluent pas significativement avec l'âge, ce qui ne nous permet pas de mettre en évidence et quantifier un retard. Comme expliqué dans la discussion de l'Article 3, il est possible qu'il existe un effet plafond pour ces deux tâches, les taux de réussite étant très élevés chez l'ensemble des participants. On peut alors supposer que nos tâches mesurent différentes composantes de l'inhibition, et/ou bien que certaines d'entre elles ne sont pas assez sensibles pour faire émerger des différences dans une population porteuse d'un TDIL. Des études supplémentaires sont nécessaires pour approfondir ces points spécifiques.

1.1.3 La mise à jour en MDT

Concernant la mise à jour en MDT, il existe un effet d'âge sur les 3 tâches (Empan dynamique verbal, Empan dynamique spatial, 2-back). Plus précisément, les résultats montrent qu'indépendamment du groupe, les performances de mise à jour en MDT s'améliorent entre le

groupe des participants âgés de 13 à 16 ans et celui des participants âgés de 17 à 20 ans. Par ailleurs, comme pour l'inhibition (tâche GNG), on observe une augmentation avec l'âge de l'écart de performance entre les individus porteurs d'un TDIL et les individus TV, ceci pour les trois tâches. Plus précisément, le retard est d'au moins 3 ans à l'âge de 10-12 ans, d'environ 7 ans à l'âge de 13-16 ans, et d'environ 11 ans à l'âge de 17-20 ans (voire plus pour la tâche d'empan verbal). L'amélioration des performances de mise à jour en MDT entre les 2 groupes plus jeunes et ceux âgés de 17 à 20 ans est conforme aux données de la littérature sur le développement typique positionnant l'apparition des capacités de mise à jour en MDT dès les premiers mois de vie, avec un pic d'amélioration vers 4 ans, suivi d'une évolution progressive jusqu'à l'adolescence (pour des revues, voir Best & Miller, 2010; Chevalier, 2010; Diamond, 2013; Fourneret & des Portes, 2017). Il existe néanmoins des divergences sur l'âge de stabilisation des performances, certains le fixant à 11 ans (Lechuga et al., 2006), d'autres à 15 ans (Carriedo et al., 2016), et d'autres encore à 18-20 ans (Conklin et al., 2007). Concernant le retard de performance que nous avons observé chez les enfants et adolescents porteurs d'un TDIL, il semble plus important que celui mis en évidence dans les travaux existants. En effet, dans notre étude, ce retard atteint 11 ans dans le groupe âgés de 17 à 20 ans, tandis qu'il est en moyenne autour de 5 ans seulement dans une étude antérieure réalisée auprès d'individus ayant entre 11 et 15 ans (Danielsson et al., 2012). Cette différence pourrait être liée aux typex de tâches utilisée, qui seraient plus ou moins chargées sur le plan exécutif et impliqueraient possiblement d'autres processus exécutifs. Ainsi, tout comme pour l'estimation des durées et l'inhibition, l'augmentation du retard avec l'âge, non rattrapé à 20 ans, est un argument en faveur de l'hypothèse d'un déficit de mise à jour en MDT dans le TDIL ; des groupes plus jeunes et plus âgés doivent néanmoins être inclus pour le confirmer.

1.1.4 La flexibilité

Concernant la flexibilité, il existe un effet développemental uniquement sur la tâche de WCST pour les enfants et adolescents porteurs d'un TDIL. En effet, les résultats montrent que les enfants porteurs d'un TDIL âgés de 10 à 12 ans ont de moins bonnes performances que les deux autres groupes plus âgés. Cet effet d'âge n'existe pas chez les participants TV. Comme pour les tâches d'inhibition et de mise à jour en MDT présentées précédemment il existe un retard d'au moins 3 ans dans le groupe âgé de 10 à 12 ans, qui augmente jusqu'à environ 7 ans dans le groupe âgés de 13 à 16 ans pour atteindre environ 11 ans dans le groupe âgé de 17 à 20 ans chez les individus porteurs de TDIL. L'absence d'amélioration avec l'âge des performances

de flexibilité chez les participants TV semble contredire les travaux antérieurs. Ceux-ci mettent en effet en évidence l'apparition des capacités de flexibilité durant la période préscolaire vers 3 à 4 ans, avec des pics d'amélioration autour de 4 à 5 ans, puis vers 7 à 9 ans, et une maturation complète entre 15 et 17 ans (pour des revues, voir Chevalier, 2010; Diamond, 2013; Fournieret & des Portes, 2017). On pouvait donc s'attendre à ce que les performances de flexibilité augmentent jusqu'à 17 ans, avec une différence entre les performances de nos deux premiers groupes d'âge (10-12 ans < 13-16 ans), ce qui n'a pas été le cas. Ceci pourrait être dû à un effet plafond sur nos tâches, les performances étant élevées chez tous nos sujets TV quel que soit leur âge (pour plus de détails, voir discussion Article 3). Concernant les participants porteurs d'un TDIL, nos données sont plus ou moins compatibles avec la littérature. En effet, il existe des divergences selon les tâches utilisés, avec des performances préservées sur certaines tâches (e.g., Kitamura et al., 2022) et des performances altérées entre 10 et 23 ans sur d'autres (e.g., Danielsson et al., 2012; Zagaria et al., 2021). Selon Kitamura et al. (2022), cette différence serait due à la charge exécutive, certaines tâches étant plus simples et d'autres plus complexes, mobilisant parfois d'autres FE que la flexibilité (MDT, inhibition, planification). Effectivement, plusieurs travaux indiquent que la tâche de WCST mobiliserait d'autres FE que la flexibilité cognitive, notamment l'inhibition, la mise à jour en MDT ou la planification (pour une revue, voir Miles et al., 2021). Il est donc possible que des effets soient uniquement observés sur cette tâche en raison de difficultés exécutives autres que la flexibilité. Cela pourrait suggérer l'absence de difficultés de flexibilité sur des tâches évaluant précisément cette fonction (CTS, ARTS) et la présence de difficultés sur des tâches évaluant en réalité d'autres FE. Concernant la question du retard ou du déficit, comme pour les autres FE, on observe un retard qui s'amplifie avec l'âge et qui n'est pas rattrapé à l'âge de 20 ans, ce qui laisse donc penser qu'il pourrait s'agir en réalité d'un déficit des capacités de flexibilité dans le TDIL. Néanmoins comme pour l'inhibition, il est nécessaire de rappeler que cette conclusion ne repose que sur les résultats à seule tâche, aucun effet d'âge (CTS, ARTS) voire de groupe (ARTS) n'étant observé sur les deux autres tâches. Des études complémentaires sont donc nécessaires pour d'une part mieux identifier les composantes altérées dans le TDIL, et d'autre part vérifier si les difficultés de flexibilité persistent au-delà de 20 ans.

1.1.5 La VTI

Chez l'ensemble des participants, la VTI augmente entre les 3 groupes d'âge : les sujets âgés de 10 à 12 ans sont plus lents que ceux âgés de 13 à 16 ans, qui sont eux-mêmes plus lents

que ceux âgés de 17 à 20 ans. D'autre part, la quantification du retard suggère un retard d'environ 3 ans chez les adolescents porteurs d'un TDIL âgés de 10 à 12 ans, d'environ 4 ans chez ceux âgés de 13 à 16 ans et d'environ 8 ans chez les plus âgés de 17 à 20 ans. L'augmentation de la VTI avec l'âge chez les individus TV est compatible avec les travaux antérieurs portant sur le développement typique (e.g., Anderson et al., 2001; Hale, 2008; Kail, 1991; Korkman et al., 2001; Salthouse & Kail, 1983). En effet, ces travaux indiquent que la VTI augmente linéairement chez l'enfant jusqu'à 15 ans elle devient comparable à celle des adultes. Aucune étude n'ayant examiné l'évolution de la VTI chez les individus porteurs d'un TDIL, nous avons supposé que celle-ci deviendrait également plus rapide avec l'âge dans cette population, ce qui semble confirmé par nos données, mais en décalage par rapport aux individus TV (c'est-à-dire en étant toujours plus lente), ce qui est également confirmé par nos données. Comme pour l'estimation du temps et les FE, l'augmentation de l'ampleur du retard avec l'âge, même s'il est moins marqué, est un argument en faveur de l'hypothèse du déficit.

Afin de conclure sur la question du retard versus déficit, force est de constater que l'augmentation de l'ampleur du retard avec l'âge chez les individus porteurs d'un TDIL sur nos tâches (Empan dynamique verbal, Empan dynamique spatial, 2-back, GNG, CRT, WCST) plaide davantage en faveur de l'hypothèse d'un déficit que d'un retard développemental. En effet, s'il existait un retard développemental, cela implique que les difficultés soient rattrapées à l'âge adulte. Or, ici le retard est toujours présent dans le groupe âgé de 17 à 20 ans, et il atteint entre 8 et 11 ans selon les tâches, ce qui est très élevé. Toutefois, des précautions s'imposent dans la mesure ces conclusions reposent parfois sur les performances d'une seule tâche pour une fonction cognitive donnée (certaines de nos tâches ne mettent pas en évidence d'effet d'âge). Cette hétérogénéité entre les tâches pourrait être due à des effets plafonds, ou plus généralement à la difficulté à évaluer des composantes exécutives distinctes (pour plus de détails, voir discussion Article 3). Des études complémentaires sont donc indispensables à double titre. D'une part, il est nécessaire de proposer des travaux incluant des groupes d'adultes âgés de plus de 20 ans mais aussi des jeunes enfants âgés de moins de 7 ans, notamment pour confirmer l'existence d'un déficit (les difficultés doivent persister à l'âge adulte). D'autre part, des travaux plus généraux portant sur la structure factorielle des FE doivent être conduits afin de déterminer si les difficultés cognitives observées dans le TDIL pourraient correspondre à l'altération de sous-processus spécifiques, et si oui lesquels. En conséquence, les implications théoriques et interventionnelles dans le TDIL seront différentes selon que l'on parle de retard ou de déficit pour désigner les difficultés d'estimation des durées, des FE et de la VTI. En effet,

contrairement au déficit les difficultés persistent quel que soit l'âge, le retard développemental implique la possibilité de rattraper les capacités cognitives à un certain âge et fait donc de l'intervention cognitive un enjeu majeur pour cette population. Cela pourrait donc impliquer des protocoles de prise en charge différents. De plus, connaître l'âge précis à partir duquel telle ou telle fonction dysfonctionne pour intervenir « au bon moment » permettrait une prise en charge plus ciblée et efficace. Ces points seront davantage discutés dans la section 3.

1.2. L'évaluation du fonctionnement cognitif dans le TDIL

La question du retard ou du déficit vient questionner l'utilisation des comparaisons en termes d'AM et d'AC développées par Binet et Simon (1908). En effet, la plupart des travaux scientifiques sur le TDI comparent les performances des participants déficients à celles de participants TV appariés à la fois sur l'AM et sur l'AC. Ainsi, les auteurs considèrent que si les participants des deux groupes TV appariés sur l'AM et l'AC sont plus performants que les participants porteurs d'un TDI, cela représente un argument en faveur d'un déficit. En revanche, si les performances des individus TV appariés sur l'AC sont supérieures à celles des individus porteurs d'un TDI alors que celles des individus TV appariés sur l'AM sont comparables à celles des individus porteurs d'un TDI, alors cela est révélateur d'un retard ; ceci dans la mesure

les groupes sont supposés être équivalents sur le plan cognitif et développemental (Henry, 2001). Plusieurs auteurs remettent en question l'utilisation même de tests d'intelligence pour évaluer les compétences cognitives dans le TDI, le résultat servant de base aux comparaisons fondées sur un appariement sur l'AM (e.g., Hessels-Schlatter, 2002; Tiekstra et al., 2009). En effet, en considérant les multiples atteintes cognitives dans le TDI, les auteurs suggèrent que ces individus pourraient échouer à de nombreuses tâches en raison de la non compréhension des consignes, de la logique des tâches, ou encore parce qu'un processus de plus bas niveau que le raisonnement qui est déficitaire est impliqué (par exemple, échec à une tâche de raisonnement parce que celle-ci mobilise des ressources plus fondamentales en mémoire à court terme), révélant ainsi un manque de validité dans ces évaluations du QI (Hessels-Schlatter, 2002, 2006; Tiekstra et al., 2009). Ces auteurs proposent alors de remplacer ces tests classiques de QI par des tests de potentiel d'apprentissage (Hessels & Gassner, 2010), c'est-à-dire des tests qui incluent une phase d'apprentissage à l'intérieur de l'évaluation. Cette phase d'apprentissage impliquerait la compréhension des consignes, l'identification des processus qui doivent être mobilisés pour résoudre la tâche, ainsi que les connaissances procédurales nécessaires à sa résolution (Tiekstra et al., 2009). Les auteurs proposent notamment d'utiliser le *Hessels*

Analogical Reasoning Test (HART), qui est un outil analogue aux matrices de Raven incluant une phase de formation (entraînement permettant l'apprentissage) et une évaluation a posteriori. Ces auteurs ont mis en évidence que contrairement à un test de QI (comme la Wechsler Intelligence Scale for Children – WISC ; Wechsler, 1949 par exemple) qui explique seulement 8,8 % de la réussite scolaire, le HART permet d'expliquer une proportion importante et significative de 40 % de la réussite scolaire. D'autre part, les travaux de Hessels et Gassner (2010) suggèrent que les enfants porteurs d'un TDIL, dont la capacité d'apprentissage serait la même que celle d'enfants TV, présentent des performances similaires en mémoire à court terme et MDT, que la charge mentale soit faible ou élevée. Enfin, les travaux récents d'Arvidsson et Granlund (2018) mettent en évidence que le QI est un moins bon prédicteur du fonctionnement quotidien chez les individus porteurs d'un TDIL que le potentiel d'apprentissage. Ces éléments viennent donc questionner l'utilisation des outils standards d'évaluation de l'intelligence par le QI, de manière statique à un moment donné dans cette population spécifique et dans d'autres populations caractérisées par des difficultés similaires (troubles neurodéveloppementaux). Ces résultats doivent néanmoins être interprétés avec précaution car la validité prédictive des tests de QI a été démontrée dans de nombreux travaux (e.g., Deary et al., 2007; Gygi et al., 2017; Hegelund et al., 2018; Roth et al., 2015), d'autant plus que ces tests sont à la base même du diagnostic de TDIL (le TDIL étant caractérisé par un QI compris entre 50 et 70 ± 5). Il serait donc judicieux de mener des recherches supplémentaires sur ce sujet, voire de combiner ces différentes mesures dans de futures études.

Plusieurs principes peuvent être tirés des études sur le potentiel d'apprentissage. D'une part, cela remet en question la constitution classique des échantillons dans les protocoles réalisés auprès de cette population. Il pourrait être pertinent de créer des groupes qui tiendraient compte de ces capacités d'apprentissage hétérogènes des participants. En effet, l'adaptation de ces outils est essentielle pour des questions de validité scientifique. Il est possible que l'utilisation de tests d'intelligence classiques n'évaluent pas réellement les fonctions cognitives ciblées, si la compréhension des consignes n'est pas vérifiée en amont. On peut donc se demander si ces évaluations ne sont pas biaisées par des difficultés de compréhension et/ou d'autres difficultés exécutives associées au TDI qui rendraient difficile le maintien des consignes en mémoire par exemple. Dans le présent travail de recherche, nous avons effectivement observé d'un point de vue clinique que la compréhension des consignes et des attendus pour une tâche était complexe pour les enfants porteurs d'un TDIL, et représentait donc un enjeu majeur lors de la création de protocoles expérimentaux à destination de cette population spécifique. C'est pourquoi, une phase d'apprentissage avait été incluse dans la

consigne de chacune des tâches expérimentales de nos protocoles. D'autre part, les fortes variabilités inter- et intra-individuelles observées chez les individus porteurs d'un TDIL sont un argument en faveur de la mise en place de protocoles expérimentaux et de modalités d'accompagnement tenant compte de l'hétérogénéité du fonctionnement cognitif des participants. Une piste de réponse est la création et l'utilisation de groupes de participants présentant des profils similaires (e.g., mêmes capacités d'apprentissage), et l'adaptation des tâches et interventions selon ces groupes. Ces éléments viennent également questionner de manière plus générale l'utilisation des tests de QI dans la pratique neuropsychologique chez des enfants porteurs d'autres troubles neurodéveloppementaux (e.g., TDAH, TSA, Troubles des apprentissages) qui peuvent être également associés à des difficultés exécutives et de compréhension. On pourrait imaginer proposer de manière combinée à ces tests des mesures de potentiel d'apprentissage par exemple. Enfin, le QI étant à la base du diagnostic du TDIL, remettre en question l'utilisation de cet outil questionne également les critères diagnostiques actuels ; ce qui constitue un débat outrepassant le cadre de ce travail de thèse.

Pour conclure, cette première section fournit quelques éléments de réponses à la question du déficit ou du retard développemental. Bien qu'il soit impossible de statuer de manière définitive et que de nouvelles études incluant des groupes d'adultes âgés de plus de 20 ans étant notamment nécessaires ; nos données semblent davantage compatibles avec l'hypothèse d'un déficit. D'autre part, la manière de mesurer l'intelligence à l'aide de tests de QI et les difficultés cognitives associées au TDIL (comparaisons basées sur l'AC et l'AM) tendent à être remises en question. De récents travaux montrent que certains individus seraient davantage capables que d'autres d'intégrer de nouveaux apprentissages, ce qui pourrait constituer le critère de sélection des participants dans de futurs protocoles d'entraînement cognitif (e.g. Arvidsson & Granlund, 2018; Hessels & Gassner, 2010). Ce point sera davantage discuté dans la section 3. La prochaine section cherchera à déterminer l'importance de chacune des fonctions cognitives étudiées dans les difficultés d'estimation des durées dans le TDIL, ainsi que leurs implications cliniques.

2. Quelles sont les fonctions cognitives impliquées dans l'estimation des durées et quelles sont les implications cliniques dans le TDIL ?

Les données de ce travail de thèse fournissent des informations précieuses pour la compréhension des fonctions cognitives impliquées dans l'estimation des durées. Dans un premier temps, les performances des participants porteurs d'un TDIL sont inférieures à celles de sujets TV appariés sur l'AC pour 11 tâches sur 12 (exception faite de l'ARTS qui évalue la flexibilité). Dans un second temps, les analyses en régressions multiples mettent en évidence que les performances de précision sur la tâche de reproduction des durées seraient majoritairement expliquées par la VTI, puis les capacités d'inhibition (MIT), de mise à jour en MDT (Empan verbal) et enfin de flexibilité (CTS). Les performances de variabilité seraient quant à elles uniquement expliquées par les performances d'inhibition à la tâche GNG. Concernant la tâche de bissection, les analyses indiquent que principalement les performances d'inhibition à la tâche GNG et dans une moindre mesure la VTI sur la tâche CRT expliquent l'amélioration de la discrimination temporelle avec l'âge, tandis que seules les performances d'inhibition à la tâche GNG expliquent les difficultés des individus porteurs d'un TDIL en comparaison avec les individus TV.

Ces résultats confirment donc que les difficultés d'estimation des durées sont bien dues à des difficultés exécutives et à la VTI, en accord avec d'autres travaux antérieurs ayant mis en évidence un lien entre l'estimation des durées, les FE, et la VTI (e.g., Droit-Volet et al., 2015; Droit-Volet & Zélanti, 2013; Ogden et al., 2011, 2014, 2019; Rattat & Chevalier, 2020). Dans le cadre du modèle d'horloge interne (Gibbon et al., 1984), estimer les durées implique la génération continue d'impulsions par un pacemaker enregistrées par un accumulateur, dont le flux est déterminé par un interrupteur pouvant être ouvert ou fermé. La durée estimée doit ensuite être maintenue en mémoire puis comparée à la durée de référence. Aussi, l'implication de chaque FE et de la VTI dans les différents niveaux de ce modèle (horloge interne, mnésique, décisionnel) peut-elle être discutée.

2.1 Le rôle de l'inhibition dans l'estimation des durées

Nos données mettent en évidence que la fonction cognitive qui expliquerait majoritairement la variabilité des reproductions de durées serait l'inhibition évaluée par la tâche GNG. Dans le cadre du modèle d'horloge interne (Gibbon et al., 1984), il est possible d'imaginer que le non maintien d'un niveau attentionnel suffisant et/ou la distractibilité (en lien

avec des performances d'inhibition moindres), pourraient augmenter la variabilité des reproductions temporelles. En effet, l'inhibition est une capacité centrale dans l'allocation des ressources attentionnelles vers le stimulus cible, et agirait donc au niveau du fonctionnement de l'interrupteur (niveau de l'horloge interne. Ainsi, si un individu est distrait, l'interrupteur s'ouvre, et l'individu perd le comptage des impulsions, tandis qu'à l'essai suivant, il peut réaliser « correctement » le comptage des impulsions s'il a correctement géré les interférences. Ces fluctuations dans l'allocation des ressources attentionnelles pourraient ainsi induire de la variabilité dans les reproductions, avec tantôt des reproductions proches de la durée de référence et tantôt des reproductions plus éloignées de celle-ci. Au regard des liens réciproques entre inhibition et mise à jour en MDT il est possible que les difficultés d'inhibition impactent également le maintien de la durée estimée en MDT (niveau mnésique). En effet, ce maintien en mémoire implique nécessairement la sélection des informations pertinentes à l'estimation de la durée cible et la suppression des informations interférentes.

Nos données indiquent également que les performances d'inhibition (évaluées par la tâche MIT) seraient impliquées dans la capacité à reproduire précisément les durées. Ainsi, des distorsions, ici des surestimations (lorsque la durée reproduite est plus longue que la durée de référence), pourraient également être dues à la difficulté à prendre en compte les stimuli pertinents, et ne pas tenir compte des stimuli non pertinents pour la tâche en cours. Un individu qui présenterait des difficultés d'inhibition serait donc moins en capacité d'identifier l'information temporelle sans être perturbé par des informations non pertinentes. Par exemple, dans la tâche de reproduction, si l'enfant est distrait lors de la présentation du stimulus cible, il ne sera en capacité d'accumuler correctement le nombre d'impulsions correspondant à ce stimulus. Ainsi, il reproduira une durée ne correspondant pas au nombre d'impulsions de la durée de référence (niveau de l'horloge interne). La prise en compte d'informations non pertinentes pourrait ainsi conduire à des distorsions dans la précision temporelle. On observe ce phénomène dans la pratique clinique avec les enfants présentant des troubles attentionnels : ils perdent le fil, et proposent une réponse généralement supérieure à la réponse attendue car ils surestiment la difficulté de la tâche. Ces résultats sont cohérents avec les travaux qui mettent en évidence que les compétences attentionnelles seraient impliquées dans l'estimation des durées (e.g., Droit-Volet & Zélandi, 2013; Hallez & Droit-Volet, 2017), compétences qui sont affectées dans le TDIL (e.g., Zagaria et al., 2021).

Enfin, concernant la tâche de bissection temporelle, l'implication majeure des capacités d'inhibition à la tâche GNG vient confirmer le rôle central de cette fonction cognitive dans l'estimation des durées. Cela signifie que quel que soit la tâche d'estimation des durées,

l'inhibition est une composante exécutive essentielle. Néanmoins, ces conclusions reposent sur les performances d'une seule tâche, ce qui engendre des précautions dans l'interprétation des résultats. Ces aspects méthodologiques seront discutés dans un prochain paragraphe.

Quel est l'impact du rôle de l'inhibition dans les difficultés d'estimation des durées des enfants porteurs de TDIL ? D'un point de vue clinique, l'inhibition est une composante impactant l'individu aussi bien sur le plan cognitif que comportemental et émotionnel. En effet, les difficultés d'inhibition dans les troubles du neurodéveloppement (observées par exemple dans le Trouble Déficitaire Attention avec Hyperactivité – TDAH ou encore dans des syndromes dysexécutifs consécutifs à des lésions acquises) peuvent impliquer selon les origines, des difficultés de contrôle, de l'impulsivité, une agitation psychomotrice, une hypersensibilité, ou encore une gestion difficile de la frustration (pour une revue, voir Mazeau et al., 2021). Dans le champ du TDIL, bien que les travaux sur les troubles cognitifs soient peu nombreux, il est admis l'existence de difficultés dans la gestion du comportement et des émotions (pour une revue, voir Richard, 2018). Ainsi, la mise en évidence de troubles de l'inhibition dans le TDIL est un enjeu central dans la prise en charge de cette pathologie. Cela implique du point de vue cognitif de prendre en compte l'impact de ces difficultés dans de multiples activités du quotidien qui mobilisent ce processus (e.g., faire deux choses en même temps, maintenir une consigne) ou encore de compétences cognitives plus complexes en lien avec l'estimation des durées (e.g., planifier, prévoir ou arriver à l'heure à un rendez-vous, réaliser les rituels du quotidien dans un temps imparti). Du point de vue comportemental et émotionnel cela implique également une bienveillance supplémentaire face aux comportements d'agitation, aux difficultés de régulation des émotions ou au non-respect de consignes et injonctions qui impliqueraient de se repérer dans le temps.

2.2 Le rôle de la mise à jour en MDT dans l'estimation des durées

Les résultats de ce travail de thèse mettent également en évidence que les difficultés temporelles observées sur la tâche de reproduction temporelle (à la fois en termes de variabilité et de précision) seraient dues à des difficultés de mise à jour en MDT évaluées par les trois tâches utilisées, et plus spécifiquement que les performances sur la tâche d'Empan dynamique verbal expliqueraient particulièrement les performances de précision temporelle. Dans le cadre théorique du modèle d'horloge interne de Gibbon et al. (1984) on peut supposer que cette fonction cognitive permet le maintien et la mise à jour des informations pertinentes à la tâche en cours. Aussi, pour estimer précisément le temps, est-il nécessaire de maintenir en mémoire

la durée de référence du stimulus cible, qui change d'essai en essai. Pour stocker l'information en mémoire de référence, l'information doit d'abord transiter en MDT. Ainsi, un enfant qui ne parviendrait pas à maintenir et à mettre à jour en mémoire cette information ne serait pas en capacité de la reproduire avec précision.

L'homogénéité des résultats sur les trois tâches utilisées confirme d'une part l'existence de difficultés dans les compétences de mise à jour en MDT dans le TDIL quelle que soit la tâche utilisée, et d'autre part conforte l'existence d'un construit commun de mise à jour en MDT. À rappeler toutefois que lorsque l'on prend en compte l'impact de l'ensemble des fonctions cognitives (inhibition, mise à jour en MDT, flexibilité et VTI), seules les performances sur la tâche d'empan verbal semblent expliquer les difficultés d'estimation des durées dans cette population. La littérature sur le développement typique a déjà mis en évidence le rôle des compétences de mise à jour en MDT dans l'estimation du temps (e.g., Baudouin et al., 2006; Brown, 2006; Ogden et al., 2011, 2014), et notamment dans une tâche de reproduction des durées (Ogden et al., 2014; 2019). En effet, des difficultés de mise en à jour en MDT pourraient être à l'origine d'erreurs de précision dans l'accumulation des impulsions qui serait parasitée par des interférences (niveau de l'horloge interne) mais également d'erreurs dans le maintien de la durée estimée en MDT (niveau mnésique).

Comme l'inhibition, la mise à jour en MDT est une composante cognitive centrale puisque mobilisée dans de nombreuses activités du quotidien (e.g., apprendre des leçons, maintenir une consigne en mémoire, réaliser plusieurs tâches simultanément, planifier, organiser) et qui peut également avoir des répercussions sur le plan émotionnel et comportemental (e.g., réguler ses émotions, accomplissement de la tâche en cours, distractibilité). Aussi, la mise en évidence de difficultés de mise à jour en MDT est un élément central dans la prise en charge des individus porteurs d'un TDIL. Cela implique, dans la création d'un protocole d'entraînement ou dans le choix des activités de loisirs, de proposer des adaptations des consignes par exemple, ou encore de répéter les informations pertinentes pour la tâche en cours. Cela implique également une attitude bienveillante face aux oublis, de répéter les informations et les consignes, et par exemple d'imager les informations nécessaires à l'estimation des durées (e.g. faire un emploi du temps visuel, utiliser des pictogrammes ou autres supports visuels pour aider au maintien en MDT des informations).

2.3 Le rôle de la flexibilité dans l'estimation des durées

Les données de nos travaux mettent en évidence l'implication des performances de flexibilité cognitive évaluées par la tâche de CTS dans les surestimations temporelles observées à la tâche de reproduction. Pour estimer le temps, il est nécessaire selon le modèle de l'horloge interne de Gibbon et al. (1984) d'alterner entre la durée du stimulus cible (de l'essai en cours) et la durée de référence. L'impossibilité d'alterner entre ces deux durées engendrerait nécessairement des reproductions temporelles plus imprécises, tout comme la difficulté à alterner entre ces durées pour les comparer. Les capacités de flexibilité sont en effet nécessaires pour alterner au niveau mnésique entre la durée reproduite et la représentation en mémoire de la durée de référence, voire au niveau décisionnel pour pouvoir comparer ces deux durées.

Plusieurs études dans le développement typique ont montré que les performances à une tâche de reproduction temporelle sont significativement corrélées avec les performances de flexibilité (Brown et al., 2013; Ogden et al., 2014, 2019; Wearden et al., 2010). Toutefois, comme pour l'inhibition, les résultats sur les tâches de flexibilité sont très hétérogènes d'une tâche à l'autre, ce qui implique des précautions dans l'analyse des résultats. Les limitations méthodologiques pouvant expliquer cette hétérogénéité seront présentées dans une prochaine section.

D'un point de vue clinique, la flexibilité cognitive est comme les autres fonctions exécutives essentielle d'un point de vue cognitif pour réaliser efficacement les activités du quotidien (e.g., alterner entre deux tâches ou deux consignes, planifier ou organiser), mais également d'un point de vue comportemental et émotionnel (e.g., alterner entre deux états mentaux ou émotions, accepter le changement, être ouvert d'esprit). Or, on observe dans le TDI des idées fixes, des difficultés à alterner entre plusieurs émotions ou encore une intolérance au changement (pour une revue, voir Richard, 2018). Par conséquent, stimuler les capacités de flexibilité cognitive représente également un enjeu majeur dans la prise en charge du TDIL et notamment dans les préconisations d'adaptation sur des tâches impliquant d'estimer le temps (e.g. permettre de visualiser les événements à venir, mettre en place des routines pour faciliter le changement et l'intégration de nouvelles consignes, l'étayage pour rassurer et éviter les persévérations).

2.4 Le rôle de la VTI dans l'estimation des durées

Enfin, nos résultats soutiennent qu'une moins bonne précision temporelle, que ce soit dans une tâche de reproduction ou de bissection temporelle, pourrait être principalement due à une VTI ralentie. En effet, au niveau du modèle de l'horloge interne, la VTI jouerait un rôle déterminant dans l'accumulation des impulsions émises par le pacemaker. Ainsi, un individu qui présenterait un ralentissement de la VTI, présenterait également un ralentissement dans l'accumulation des impulsions ce qui induirait une distorsion dans sa perception d'un stimulus temporel qu'il ne pourrait pas estimer avec précision. La littérature sur le développement typique indique effectivement que la VTI est l'un des prédicteurs les plus fiables de la variabilité et de la précision dans une tâche de la reproduction ou de bissection temporelle chez des enfants âgés de 5 à 8 ans et des adultes (e.g., Droit-Volet et al., 2015; Droit-Volet & Zélanti, 2013). Les résultats de notre étude sont cohérents avec ceux de l'étude de Droit-Volet (2010) révélant l'implication d'une composante motrice dans les surestimations temporelles évoquées en introduction. En effet, les enfants présenteraient un ralentissement dans la mobilisation des composantes motrices pour reproduire des durées, induisant des surestimations. Néanmoins, l'utilisation d'indices temporels relatifs (indices calculés par rapport à la propre performance de l'individu) devait prendre en compte que le ralentissement puisse impacter à la fois le traitement de l'information temporelle et la reproduction de la durée (si la VTI est plus lente elle devrait être plus lente à la fois pour traiter la durée cible et reproduire celle-ci). Cela suggère soit que d'autres facteurs que la VTI rentrent en compte dans ces surestimations, soit que le calcul ce type d'indice n'est pas suffisant pour contrôler l'impact de la VTI.

D'un point de vue clinique, la VTI est une composante de bas niveau qui est nécessaire à la mise en œuvre de nombreuses capacités cognitives du quotidien qu'elles soient assez simples comme prendre une décision, lire, parler, conduire (Albinet, 2015) ou qu'elles soient plus complexes comme planifier ou estimer des durées (Zakay, 2012). Aussi, un ralentissement de la VTI pourrait être à l'origine de difficultés multiples dans le quotidien de l'individu porteur d'un TDIL. Cela peut se traduire par un ralentissement dans le traitement des informations (au niveau cognitif), mais également par un ralentissement dans le geste graphique, dans la parole, dans la réalisation des activités du quotidien, la capacité à s'investir dans une nouvelle tâche (niveau comportemental), ou encore par un ralentissement dans la compréhension des situations, de ses propres émotions et de celles des autres (niveau émotionnel). Ainsi, prendre en compte les conséquences d'une VTI ralentie est essentiel dans la prise en charge du TDIL. Cela implique comme pour les FE des adaptations dans toutes les situations mobilisant un

traitement de l'information y compris de l'information temporelle (e.g. adapter le rythme des séances, accorder plus de temps pour répondre, accepter que l'alliance thérapeutique mette du temps à se mettre en place ou qu'un entraînement mette du temps pour être efficace).

2.5 Limitations méthodologiques

Nos données confirment donc l'existence d'un lien entre l'estimation des durées, les FE et la VTI, bien que celui-ci soit dépendant de la tâche. Plus précisément, estimer des durées de manière précise dans une tâche de reproduction nécessiterait à divers degrés des capacités efficaces d'inhibition (MIT), de flexibilité (CTS), de mise à jour en MDT (Empan dynamique verbal) et de VTI (CRT). La reproduction de durées stables (peu variables) impliquerait quant à elle spécifiquement des compétences d'inhibition (GNG). La capacité à discriminer des durées dans une tâche de bissection dépendrait majoritairement de l'implication des compétences d'inhibition (GNG) et de VTI (CRT). Plusieurs limitations méthodologiques permettent d'expliquer l'hétérogénéité des résultats selon les tâches utilisées.

Bien que nos tâches aient toutes un score de fiabilité très élevé, il est possible qu'elles mesurent des processus de complexité différente ou bien des processus quelque peu différents. En effet, le rôle de l'inhibition dans l'estimation des durées est controversé dans la littérature, certaines études mettant en évidence un lien entre les ressources d'inhibition et l'estimation de la durée (e.g., Brown, 2006; Brown et al., 2013; Rattat & Chevalier, 2020) et d'autres non (e.g., Fortin et al., 2010; Ogden et al., 2011). Selon Brown et al. (2013) ou encore Ogden et al. (2011) ces résultats contradictoires proviendraient du type de tâche utilisée, les effets de l'inhibition sur les estimations de durées étant plus accentués dans les tâches plus complexes. De la même manière, certains travaux ont mis en évidence des difficultés de flexibilité dans le TDIL (e.g., Danielsson et al., 2012; Van der Molen et al., 2007) et d'autres non (e.g. Kitamura et al., 2022) en raison d'une différence de complexité des tâches, les performances de flexibilité cognitive dans des tâches simples étant préservées. Il s'agit d'une première hypothèse permettant d'expliquer la différence de résultats entre nos 3 tâches : il est possible que la tâche de GNG mobilise davantage de ressources sur le plan exécutif que les tâches de MIT et de RAST pour l'inhibition, il en serait de même pour la tâche de WCST par rapport aux tâches de CTS et d'ARTS. En effet, les pourcentages de réponses correctes élevés chez tous les sujets à ces tâches vont dans le sens d'un potentiel effet plafond, et donc des tâches peut-être trop simples pour eux. Ainsi l'utilisation de ces tâches ne permettrait pas de mettre en évidence des effets de l'âge et du TDIL.

Outre la complexité de la tâche, une autre explication est que les trois tâches d'inhibition et les trois tâches de flexibilité ne mesurent pas un seul et même processus exécutif. L'impossibilité de calculer un score composite valide pour les tâches d'inhibition et de flexibilité semble aller dans ce sens. Pour l'inhibition, il semble que la tâche de GNG soit la seule tâche exécutive mobilisant la dimension motrice dans nos protocoles, et la seule dont les performances des sujets sont dépendantes de cet aspect moteur. En effet, l'enfant appuie sur les touches d'un boîtier pour donner sa réponse. Il doit attendre pour ne pas appuyer trop tôt, et au bon moment sur la touche. Dans son étude de 2010, Droit-Volet a mis en évidence que la surestimation de durées courtes dans une tâche de reproduction temporelle serait due à des composantes motrices. En effet, la mobilisation de cette composante prendrait plus de temps chez l'adulte que chez l'enfant (e.g., Droit-Volet, 2010; Gathercole et al., 2004; Kail, 1991) bien que la réponse motrice soit générée au même moment. Cette composante serait uniquement impliquée dans la reproduction de durées courtes (2.5 s) et ne prédirait pas les performances de reproduction pour des durées longues (4.5 s). Ainsi, un défaut d'inhibition induirait sur le plan moteur des difficultés pour s'empêcher de répondre vite produisant des surestimations mais également des réponses plus variables en fonction des fluctuations attentionnelles (reproduction proche de la durée cible lorsque l'attention est efficiente et éloignée en cas de distractibilité). Il est donc possible de se demander dans quelle mesure la variabilité temporelle ne serait pas expliquée par la dimension motrice de l'inhibition de la tâche GNG. L'absence de lien entre la variabilité des performances sur la tâche de reproduction et celle de nos 9 autres tâches cognitives est un argument en faveur de cette idée. De plus, plusieurs auteurs identifient différents sous-processus d'inhibition. La taxonomie de Nigg (2000) présentée en introduction postule par exemple l'existence de plusieurs formes d'inhibition (l'inhibition exécutive, le contrôle de l'interférence, l'inhibition cognitive et l'inhibition motivationnelle). En considérant ces différents processus d'inhibition, nous pouvons émettre l'hypothèse que la tâche de GNG mobiliserait davantage l'inhibition exécutive que les tâches de MIT et de RAST. En effet, dans les tâches de MIT et de RAST, le participant doit seulement sélectionner directement le stimulus pertinent parmi les deux présentés, alors que dans la tâche GNG, il n'a pas à choisir le stimulus pertinent, il doit à la fois sélectionner le stimulus pertinent lorsqu'il est présenté, et contrôler son comportement pour ne pas sélectionner le stimulus non pertinent lorsqu'il est présenté. Cela pourrait suggérer que les individus porteurs d'un TDIL présentent un retard de développement spécifique à la dimension de l'inhibition exécutive. Concernant la flexibilité, plusieurs travaux remettent en question la spécificité de la tâche WCST (pour une revue, voir Miles et al., 2021). En effet, il semblerait que contrairement à des tâches d'alternance simple de critère comme les

tâches de CTS ou d'ARTS, la tâche de WCST mobilise également des capacités d'inhibition, de MDT et de planification. Aussi, il est possible de se demander si les participants porteurs d'un TDIL présentent des performances inférieures à celles d'enfants TV à cette tâche non pas en raison de difficultés de flexibilité, mais parce que leurs capacités d'inhibition, de MDT ou encore de planification sont moins efficaces.

De manière plus générale, ces données viennent remettre en question la structure factorielle des FE. En effet, en considérant que nos tâches d'inhibition et de flexibilité, bien que fiables, ne mesurent pas toutes le même processus, ou bien des sous-processus d'une même FE, il est possible de se demander si le modèle à 3 facteurs défendu par Diamond (2013) ou encore Miyake et al., (2000) est valide. Des travaux récents utilisant des modèles en réseaux ont montré des effets différents selon la tâche exécutive utilisée pour mesurer une FE cible, et ils ne retrouvent pas de construit commun dans la structure factorielle pour chaque FE (e.g., Holmén et al., 2024; Rosales et al., 2023). La flexibilité cognitive, la mise à jour en MDT et l'inhibition n'expliquent pas suffisamment la variance des tâches cognitives. Ces résultats soutiennent la révision du modèle de Miyake et remettent en question l'évaluation des FE à l'aide de modèles factoriels. Bien que l'analyse a priori de la littérature montre qu'il faut isoler les FE de manière expérimentale pour les évaluer, on peut se demander dans quelle mesure il existe plus que trois facteurs, ou bien s'il faut considérer un fonctionnement exécutif plus global. Dans ce cas, comment évaluer les FE si on ne se base pas sur un modèle factoriel ? Les batteries et tests existants sont circonscrits à un seul et même processus (en essayant de contrôler les autres) ce qui permet difficilement d'extraire d'une structure factorielle. En effet, les tâches utilisées en neuropsychologie clinique évaluent indépendamment l'inhibition, la mise à jour en MDT, et la flexibilité cognitive. Néanmoins, on observe depuis quelques années une émergence de tâches dites écologiques, proposant l'évaluation des FE via des activités du quotidien mobilisant plusieurs FE à la fois, comme c'est le cas dans la vie quotidienne (e.g., préparer une recette et cuisiner, réaliser un itinéraire). Il existe donc au-delà de ce travail de thèse, un enjeu de validation des construits théoriques et des outils méthodologiques qui rendent compte de la réalité des FE.

Afin de conclure sur ces limitations, plusieurs points peuvent se dégager. Dans un premier temps, il semble nécessaire d'utiliser des tâches de complexité et de charge exécutive suffisante pour mettre en évidence des difficultés cognitives dans le TDIL. Bien que les analyses de fiabilité confirment la pertinence de nos tâches, il semble important pour les études à venir de déterminer plus précisément les sous-processus exécutifs mobilisés par chaque tâche utilisée.

Une autre solution serait d'envisager le fonctionnement exécutif de manière plus globale en ne proposant pas des tâches basées sur un modèle factoriel mais des tâches mobilisant de manière générale l'ensemble des FE. Cela implique de développer davantage de tests normés et valides dans différentes populations. Il semble également que la dimension motrice soit centrale dans les difficultés d'estimation des durées chez les individus porteurs d'un TDIL. Il serait donc judicieux de proposer une évaluation plus approfondie des compétences motrices et praxiques afin de mieux comprendre les difficultés cognitives dans cette population. Des travaux complémentaires évaluant les fonctions cognitives dans le TDIL sont donc nécessaires pour identifier l'éventuel impact de d'autres facteurs, telle que la mémoire à long terme, l'attention soutenue ou des facteurs davantage émotionnels. Nos données fournissent néanmoins pour la première fois des éléments de compréhension sur l'implication des fonctions cognitives dans l'estimation des durées dans le TDIL. La VTI jusqu'alors jamais investiguée de manière développementale dans le TDIL est un prédicteur important des performances d'estimation des durées dans cette population et devrait être pris en compte dans les futures recherches. La prochaine section examinera les enjeux et limites de la mise en place d'un entraînement cognitif auprès d'individus porteurs de TDIL, et d'un point de vue plus global les perspectives de prises en charge pour cette population spécifique à court et plus long terme.

3. Peut-on entraîner les fonctions cognitives chez des enfants porteurs d'un TDIL ?

Notre seconde étude a évalué la faisabilité et l'efficacité d'un entraînement cognitif proposé à 5 adolescents porteurs d'un TDIL âgés de 11 à 14 ans, dont les performances ont été comparées à celles de 5 adolescents porteurs d'un TDIL apparié en AC n'ayant pas bénéficié de cet entraînement spécifique. Les résultats mettent en évidence qu'il est possible de mettre en place un tel protocole, aussi bien dans l'intérêt des adolescents que de celui des éducateurs et professionnels de santé. Toutefois, les résultats concernant l'efficacité de cet entraînement ne permettent pas de statuer définitivement sur une amélioration ou non des performances cognitives de ces adolescents. En effet, il existe des améliorations aussi bien chez les adolescents du groupe contrôle que chez ceux du groupe ayant bénéficié de l'entraînement, et l'ampleur de ces améliorations est également variable entre les adolescents, les groupes et les tâches. Des travaux complémentaires permettant soit une analyse individuelle, soit d'obtenir

une mesure de référence pour définir une amélioration et une dégradation sont donc nécessaires pour statuer sur la question de l'efficacité. Cette section examinera de manière plus générale la possibilité d'entraîner les fonctions cognitives dans le TDIL sur le terrain, dans les institutions de santé (e.g., IME).

3.1 Peut-on proposer un entraînement universel à des individus aux profils cognitifs variés ?

Dans un premier temps ce travail vient confirmer l'existence d'une forte variabilité intra et inter-individuelle (déjà mise en évidence entre autres dans les sphères du langage et de la motricité) qui impacte fortement les évaluations et interventions auprès des individus porteurs d'un TDIL. Elle est également due aux prises en charge, au mode de vie, et aux parcours médicaux qui sont très variables d'un individu à l'autre. Au-delà de l'hétérogénéité des profils cognitifs, on observe une forte variabilité dans les performances aux différentes tâches cognitives. De manière plus générale, cela nous amène à nous demander si cette hétérogénéité observée ne serait par caractéristique du TDIL. Plus précisément, répondre de manière variable et hétérogène pourrait être un patron spécifique aux individus porteurs d'un TDIL. Il semble donc nécessaire d'utiliser une méthodologie ou des outils permettant soit de réaliser une analyse individuelle et spécifique des données soit de mettre en œuvre un entraînement spécifique propre à chaque individu. L'utilisation d'une méthodologie individuelle de type Single Case Experimental Design (SCED, Krasny-Pacini & Evans, 2018; Tate et al., 2016) permet d'évaluer l'efficacité d'un entraînement à l'aide de la comparaison de plusieurs mesures répétées d'un même individu. Plusieurs travaux visent à rendre l'utilisation du SCED possible aux cliniciens pour évaluer leurs interventions (e.g., Graham et al., 2012; Lane & Gast, 2014; Manolov & Moeyaert, 2017). Cette méthodologie présente également l'avantage de pouvoir comprendre la source de la variabilité inter-sujets (pour une méta-analyse, voir Gabler et al., 2011). Elle implique de prendre plusieurs précautions. En l'occurrence, il est nécessaire d'identifier une mesure répétée pertinente pour chaque fonction cognitive, et d'allonger la durée du protocole afin de mettre en place la méthodologie expérimentale qui nécessite de différer les dates de début de mise en place du protocole. D'autres outils comme la méthode Goal Attainment Scaling (GAS ; Kiresuk & Sherman, 1968) par exemple consiste à élaborer et utiliser des échelles d'évaluations personnalisées. Un comportement observable est choisi puis évalué selon 5 niveaux. Cette méthode permet d'évaluer l'efficacité d'une intervention à travers l'accomplissement de plusieurs objectifs (pour plus de détails voir Seguin et al., 2018). Ainsi,

plusieurs outils pourraient permettre d'étudier des données de manière individualisée dans une population porteuse de TDIL. Néanmoins, la mise en place de protocoles individualisés dans les institutions est difficile en raison du manque de moyens humains et matériels dans les institutions médico-éducatives.

Ce questionnement sur l'utilisation d'une méthodologie universelle peut s'étendre au champ de la clinique en général dans les institutions, qu'elles soient médicales, éducatives ou les deux. Aujourd'hui, on parle de troubles du neurodéveloppement pour désigner des individus avec des profils caractérisés par des difficultés cognitives (comme par exemple le Trouble développemental de la coordination, le Trouble Déficitaire de l'Attention ou encore le TDIL que nous étudions), pour lesquels on propose des prises en charge visant à compenser ou améliorer ces difficultés cognitives. Or, ces objectifs de soins découlent des considérations selon lesquelles : un individu qui présente un trouble du neurodéveloppement sera nécessairement en difficulté pour réussir sur le plan scolaire et professionnel. Cette considération due à des injonctions sociétales nécessaires dans le monde, parmi lesquelles le système scolaire ou encore les diplômes d'études supérieures, peut placer ou au contraire empêcher de placer les individus dans certains parcours, opportunités professionnelles ou prises en charges. Beaucoup de jeunes porteurs de Troubles des apprentissages ou de Troubles attentionnels sont orientés vers des parcours professionnalisants, des classes spécialisées ou des études moins longues parce que l'on considère que leurs ressources ne sont pas suffisantes pour réussir certains apprentissages. Or, beaucoup d'entre eux avec des adaptations durant leur enfance ou par eux-mêmes à l'âge adulte parviennent à mobiliser et compenser des fonctions cognitives considérées comme altérées dans leur profil. En adoptant plutôt une conception plus individualiste dans laquelle chaque individu possède des capacités et des difficultés (certains ayant nécessairement plus de capacités que d'autres et d'autres moins) on maximise d'une part la possibilité pour l'individu de cibler ses difficultés, et on lui permet d'autre part d'identifier ses forces et de s'appuyer sur elles pour prendre confiance en lui et essayer de compenser ses difficultés.

Cette conception remet en question l'utilisation de diagnostics, dont la pertinence est essentielle aujourd'hui pour guider les prises en charge. Ces diagnostics sont élaborés en opposition à ce qui est considéré comme la norme. Or, cette norme est-elle bien circonscrite ? Selon la Haute Autorité de Santé (HAS, 2020), le taux de prévalence des Troubles du Neuro-Développement serait en constante augmentation, et atteindrait les 5% (soit 35000 naissances par an). Cette augmentation est nécessairement liée à l'amélioration de l'orientation et du repérage des difficultés cognitives, émotionnelles et comportementales. Néanmoins, on peut se

demander si de tels taux ne reflètent pas la difficulté à prendre en compte les individualités des uns et des autres et si d'autres classifications ne seraient pas plus pertinentes. Cela questionne également les contenus des enseignements scolaires par exemple. Si 5 enfants sur trente par classe nécessitent des adaptations que les enseignants n'ont pas toujours les moyens de mettre en place (manque de moyens humains et matériels), ne faut-il pas repenser les contenus et supports pour qu'ils soient soit accessible à tous soit au choix en fonction des ressources de chacun. Aujourd'hui les systèmes éducatifs, médicaux, et paramédicaux sont en difficulté d'une part pour former et informer les différents acteurs du bien-être de l'enfant (parents, enseignants, médecins, psychologues, institutions, etc...) et d'autre part pour proposer et mettre en œuvre des prises en charge compatibles avec les contraintes et injonctions de tous ces acteurs et milieux. Par ailleurs, il n'existe aujourd'hui aucun parcours de soin consensuel et connu de tous sur la prise en charge des troubles du neurodéveloppement. Il existe donc aujourd'hui un enjeu majeur d'informer sur les troubles du neurodéveloppement, les éducateurs et les professionnels de santé compétents, de définir des parcours de soins pour les familles, le corps éducatif et le corps médical, et de proposer soit des prises en charge qui soient compatibles avec les différents milieux et acteurs, soit de repenser les fonctionnements institutionnels pour qu'ils prennent en compte les individualités. Ce questionnement doit évidemment se faire au regard du degré de sévérité des troubles, certaines pathologies ne pouvant pas être compatibles avec un fonctionnement dit classique.

Bien qu'il soit difficile de proposer des solutions claires à ce débat, ce travail de thèse suggère que l'étude du fonctionnement cognitif des individus porteurs d'un TDIL nécessite une approche beaucoup plus spécifique, et que de futures études sont nécessaires pour déterminer comment prendre en compte ses spécificités. Une première étape à l'étude spécifique des FE dans le TDIL, est l'utilisation d'outils adaptés à cette population, comme nous le développons dans la section suivante.

3.2 Quels outils d'évaluation et d'intervention pour le TDIL ?

Concernant les FE, il n'existe à l'heure actuelle que peu de tests les évaluant chez l'enfant et l'adolescent (Roy, 2015) et très peu sont adaptés ou validés auprès d'une population porteuse d'un TDIL. Par ailleurs, nous avons mis en évidence dans une section précédente qu'il était possible de remettre en question la structure factorielle des FE. À ce titre, il est possible de se demander quels seraient les outils permettant d'évaluer au mieux les FE dans le TDIL. La

création de tâches expérimentales adaptées au TDIL comme nous l'avons fait semble présenter la difficulté de ne pas parvenir à cibler précisément un processus. Une autre possibilité serait de considérer les FE comme un fonctionnement exécutif global qui serait évalué à l'aide de tâches mobilisant l'ensemble des FE. Dans le développement typique, on a pu observer un essor de tests exécutifs dits écologiques, c'est-à-dire des tests s'approchant au mieux des conditions de la vie quotidienne (e.g., réaliser une recette de cuisine, planifier un itinéraire ; Boyd & Sautter, 1993; Chevignard et al., 2008; Le Thiec et al., 1999). Ces tests ont pour objectifs de pallier aux difficultés de mesure des FE, et présentent l'avantage d'évaluer plusieurs FE à la fois. Cette idée a d'autant plus de sens qu'au quotidien les FE sont mobilisées de manière simultanée (Roy, 2015). Il est donc possible de se demander si ce type de tests pourraient servir lors d'un entraînement chez des individus porteurs de TDIL, ou bien être utilisées de manière combinée avec des tâches classiques évaluant individuellement chaque FE.

Un autre point central dans la question du choix de l'outil est la mobilisation des FE dites chaudes. En effet, d'un point de vue clinique les émotions et la motivation sont des éléments clés dans l'apprentissage, et cela particulièrement dans les troubles du neurodéveloppement. En effet, le format ludique ou encore l'étayage par l'intervenant favorisent la motivation (Büchel & Paour, 2005 ; Bussy et al., 2016), permettant ainsi à l'enfant de mobiliser ses ressources cognitives sans qu'il n'ait conscience que cela soit coûteux cognitivement. L'enfant, pris dans le jeu, ne se rend pas réellement compte qu'il stimule son fonctionnement cognitif, et, étayé par l'expérimentateur il prend confiance en lui et en ses capacités. En effet, ces enfants sont très sensibles au lien affectif, et notamment avec l'adulte. Ainsi cette collaboration favorise l'adhésion de l'enfant à l'accompagnement, et lui permet de maximiser ses capacités, l'adulte pouvant cibler précisément la zone proximale de développement définie par Vygotsky (1978) (écart entre ce que l'enfant sait faire seul et ce qu'il peut faire s'il est accompagné). Cliniquement, si la séance est trop facile, l'enfant n'est pas stimulé et désinvestit parfois la tâche, et a contrario si elle est trop difficile, le sentiment d'échec peut également induire chez lui un désinvestissement de la tâche. Les outils d'intervention proposés dans la littérature à destination des personnes porteuses d'un TDI, qu'ils soient issus des courants de l'éducation cognitive ou de la psychologie (pour des revues, voir Goulat et al., sous presse; Perret, 2016; Perret & Bailleux, 2019; Richard, 2018), ne prennent généralement pas en compte cette dimension émotionnelle, en plus de ne pas être spécifiques aux formes légères de TDI.

Dans notre protocole d'entraînement, un travail sur ces composantes sociales et émotionnelles a été inclus. Aussi chaque FE a-t-elle été travaillée aussi bien d'un point de vue cognitif pur que comportemental (e.g., l'inhibition par la gestion de l'interférence dans un jeu,

mais également par le contrôle du comportement pour résister à l'impulsivité). Un autre axe, celui de la métacognition, a permis en incitant l'enfant à identifier ses forces et ses faiblesses, à mettre en place plus rapidement des stratégies dans les situations où il était en difficulté, et à charger davantage sur le plan exécutif lorsqu'il était en situation de réussite. Ces versants exécutifs dit chauds semblent donc essentiels dans le choix d'outils ou de protocoles d'intervention auprès d'individus porteurs d'un TDIL.

Dans la continuité de cette approche métacognitive, et au regard de l'hétérogénéité de l'amélioration des performances sur les différentes tâches, il est possible de se demander si au lieu de proposer un entraînement basé sur des tâches ou des jeux mobilisant les fonctions cognitives altérées, il ne serait pas plus judicieux d'enseigner des stratégies ou des méthodes pour réussir ces tâches. On pourrait imaginer des outils transversaux permettant d'identifier les forces et les faiblesses de l'individu mais également comment mettre en place une méthodologie, en tenant compte bien sûr des aspects motivationnels. Ce questionnement sur l'utilisation d'une approche métacognitive ouvre le débat entre l'entraînement des capacités déficitaires versus la compensation via l'appui sur les ressources (pour une revue, voir Seguin et al., 2018).

3.3 Entraîner les fonctions altérées ou compenser en s'appuyant sur les ressources dans le TDIL ?

Ce questionnement plus général rejoint celui présenté dans la première partie sur l'hypothèse d'un retard développemental ou d'un déficit dans le TDIL. En effet, bien que nos données ne permettent pas de statuer définitivement sur la question du retard ou du déficit, on observe des difficultés dans l'acquisition de certaines capacités cognitives chez les enfants porteurs d'un TDIL qui ne sont toujours pas rattrapées à l'âge de 20 ans. Si ce déficit est avéré, on peut se demander dans quelle mesure il est possible de rééduquer des fonctions cognitives déficitaires. De par leurs difficultés rencontrées aussi bien sur le plan social, pratique, que cognitif, les enfants porteurs d'un TDIL, et d'un TDI plus généralement, sont souvent placés en institution médico-sociale, bénéficient de suivis adaptés, et sont préparés à des métiers plutôt techniques mobilisant des compétences simples et ne sont pas souvent amenés à mobiliser par eux-mêmes des fonctions complexes de raisonnement. Il est donc possible de se demander si ces fonctions cognitives dont on cherche souvent à limiter la mobilisation dans les activités du quotidien, peuvent être entraînées afin d'améliorer leurs capacités d'adaptation à l'environnement qui les entoure et par extension leur bien-être. Pour faire le parallèle, les

compétences émotionnelles, bien que souvent altérées chez les individus porteurs d'un TDIL (e.g., Gawrylowicz et al., 2012, 2013; Gresham & MacMillan, 1997; Houtkamp et al., 2017; van Nieuwenhuijzen & Vriens, 2012) semblent davantage requises au quotidien que les compétences purement cognitives ; dans la mesure où les individus porteurs d'un TDIL sont quotidiennement au contact d'autres individus (parents, enseignants, professionnels de santé, pairs, collègues) et qu'il est quasi impossible de limiter leur mobilisation au quotidien. Ainsi, il est possible d'imaginer que la communication sociale, la compréhension et la régulation émotionnelle pourraient constituer des enjeux d'adaptation plus importants dans leur vie quotidienne. Les travaux réalisés auprès de cette population montrent que le retard de compréhension émotionnelle (notamment de théorie de l'esprit, soit la capacité d'un individu d'attribuer des états mentaux à soi-même et à autrui) dans le TDI est rattrapé à l'âge adulte (e.g., Baurain & Nader-Grosbois, 2013; Fiasse & Nader-Grosbois, 2012; Thirion-Marissiaux & Nader-Grosbois, 2008; Treillet et al., 2014). S'il existe un retard rattrapé avec l'âge des fonctions émotionnelles et sociales, on peut se demander si les fonctions cognitives pourraient être rattrapées de la même manière, ou si les difficultés persisteraient à l'âge adulte. Dans ce dernier cas, un entraînement cognitif dans cette population spécifique peut-il améliorer le fonctionnement cognitif quotidien ? Les travaux d'entraînement cognitif des FE mis en œuvre chez des individus porteurs d'un TDIL (e.g., Danielsson et al., 2015; Orsolini et al., 2015, 2019; Van der Molen et al., 2010) montrent des améliorations à court terme qui ne sont pas systématiquement maintenues sur le long terme, avec des possibilités de transfert à d'autres fonctions très hétérogènes (Bussy et al., 2016). La présence de limitations méthodologiques et l'hétérogénéité des profils peuvent expliquer la difficulté à proposer un entraînement efficace. Néanmoins, les travaux d'entraînement et de remédiation de manière plus générale dans les troubles du neurodéveloppement montrent des effets variables d'un individu à l'autre, avec de meilleurs résultats chez des individus plus âgés lorsque les composantes de métacognition sont mobilisées (pour une revue, voir Hessels-Schlatter et al., 2021). Il est donc pertinent de se demander si au lieu d'entraîner des fonctions déficitaires il ne serait pas plus judicieux d'entraîner ou sur-stimuler les fonctions efficaces chez l'individu afin de lui permettre de mettre en place des mécanismes et stratégies de compensation (Deforge, 2011), technique qui a déjà été mise en évidence dans le cadre scolaire (e.g., Pelham & Fabiano, 2008). Au vu du tableau cognitif où les difficultés sont souvent à plusieurs niveaux (langage, motricité, raisonnement, FE) dans le TDIL, il semble possible à l'aide d'une méthodologie individualisée et basée sur la métacognition d'axer davantage sur l'apprentissage de stratégies de compensation. Néanmoins, les capacités métacognitives semblent également retardées dans le

TDIL et ne peuvent donc pas être mobilisées avant un certain âge. Cela suggère qu'un entraînement basé sur cette compétence serait plus efficace chez des individus plus âgés. Or, au regard des phénomènes de plasticité cérébrale, on aurait pu penser qu'un entraînement serait davantage bénéfique chez des individus plus jeunes. Des travaux complémentaires sont donc nécessaires soit pour cibler précisément si certaines tranches d'âge pourraient davantage bénéficier d'un entraînement, ou bien si les protocoles en terme de contenu et de format ne doivent pas évoluer au cours du développement.

3.4 Perspectives et ouvertures

Afin de conclure, ce travail de thèse offre plusieurs perspectives dans la compréhension, l'évaluation et la prise en charge du TDIL. Un premier enjeu est de statuer définitivement sur la question du retard ou du déficit. Les futurs travaux sur le TDIL devront inclure à la fois des enfants plus jeunes et des adultes plus âgés, afin de déterminer si les difficultés cognitives persistent avec l'âge. Statuer sur le retard ou le déficit permettra également d'optimiser la manière de prendre en charge les difficultés cognitives présentes chez les individus porteurs d'un TDIL.

Tandis qu'il est possible d'entraîner des fonctions retardées, qu'en est-il de fonctions déficitaires ? Un second enjeu est donc de déterminer si les individus porteurs d'un TDIL bénéficieront d'un entraînement cognitif ou plutôt de la mise en place de stratégies de compensation. Les programmes aujourd'hui ne semblent pas indiquer d'amélioration significatives sur le plan cognitif qui puissent être maintenues à long terme. D'autre part, la mise en place de stratégies de compensation est aujourd'hui fortement utilisée que ce soit de manière formelle dans des prises en charge paramédicales (e.g., orthophonie, psychomotricité, psychologie) ou bien de manière informelle dans le quotidien des enfants porteurs d'un TDIL (e.g., parents, éducateurs, professionnels de santé). Ces deux possibilités doivent être donc explorées afin de déterminer s'il est oui ou non possible d'entraîner des fonctions déficitaires dans le TDIL, et afin de proposer à ces individus des perspectives qui favorisent leur bien-être. On peut également imaginer combiner des méthodes d'entraînement et de compensation.

En lien avec cette idée, un troisième enjeu est d'identifier si certains individus ou certains sous-groupes d'individus porteurs de TDIL pourraient davantage bénéficier d'un entraînement que d'autres. En effet, au regard de la forte variabilité intra et inter-individuelle dans le TDIL, il est possible que certains individus soient davantage enclins à améliorer leur fonctionnement cognitif. Bien que cela soulève des considérations éthiques puisque cela

conduirait à ne pas inclure certains individus dans certains protocoles d'intervention, cela permettrait de davantage individualiser l'accompagnement et de s'approcher au mieux des besoins de chaque individu. Cet enjeu vient néanmoins se heurter aux possibilités humaines et matérielles de pouvoir proposer des entraînements individualisés.

La structure factorielle des FE constitue un quatrième enjeu qu'il est important d'étudier plus en détail, à la fois pour l'évaluation et l'intervention, et ceci même au-delà du TDIL. En effet, les évaluations aujourd'hui reposent sur l'existence de trois ou plusieurs processus exécutifs distincts. Si on remet en question cette structure, comment évaluer les FE dans les protocoles de recherche ? À l'heure actuelle, il existe peu voire pas d'outils évaluant les FE qui soient spécifiques au TDIL. Les outils utilisés sont généralement des adaptations d'outils à destination d'individus TV ou bien des outils à destination d'individus présentant d'autres troubles que le TDI ou porteurs TDI de formes et d'origines diverses. Des travaux supplémentaires sont par conséquent nécessaires pour approfondir l'étude de la structure factorielle ou non des FE. Il pourrait par ailleurs être judicieux d'élaborer des outils permettant d'évaluer un fonctionnement exécutif global (sans structure factorielle), ainsi que de normer ou adapter ces outils aux individus porteurs d'un TDIL.

Enfin un cinquième et dernier enjeu est l'adoption d'une conception individuelle du fonctionnement cognitif des individus, dans le champ du TDIL et de la clinique des troubles du neurodéveloppement de manière générale. Il est nécessaire à court terme d'informer les différents acteurs sur les troubles du neurodéveloppement, de définir des parcours de soins et des prises en charge adaptés compatibles avec tous les acteurs et milieux. La pertinence des diagnostics doit par ailleurs rester un questionnement permanent. D'une part, ceux-ci sont basés sur l'utilisation de tests de QI, qui bien qu'ayant une très bonne validité prédictive, ne prennent pas en compte l'expérience, le vécu de l'individu et ses potentialités d'apprentissage. D'autre part, ils positionnent l'individu dans une catégorie clinique dont il est parfois difficile de s'extraire. Enfin, ils impliquent aujourd'hui la mise en place d'un nombre considérable de préconisations sur le plan scolaire, médical et institutionnel, qui ne sont pas toujours compatibles avec les différents milieux et acteurs impliqués, ni avec les moyens humains et matériels. Aussi, adopter une conception plus individuelle du fonctionnement cognitif, émotionnel et comportemental, en considérant l'individu non pas avec un profil correspondant à un diagnostic mais plutôt avec un certain nombre de forces et de faiblesses pourrait être bénéfique à plusieurs niveaux. Cela remet plus généralement en question le fonctionnement du système éducatif, médical et paramédical et des différentes institutions concernées

Conclusion générale

Afin de conclure, ce travail de thèse a permis de mettre en évidence le rôle de l'inhibition, la flexibilité cognitive, la mise à jour en MDT et la VTI dans les capacités d'estimation des durées. D'une part, les données de ces études confirment que les difficultés d'estimation des durées dans le TDIL sont dues à des difficultés dans le développement de ces fonctions cognitives non rattrapées à l'âge de 20 ans. D'autre part, elles mettent en évidence qu'il est possible de mettre en œuvre un entraînement cognitif tenant compte des spécificités du TDIL. Des travaux complémentaires utilisant des méthodologies d'analyse individuelle, comme le SCED, seraient une piste à privilégier afin de déterminer si un tel entraînement peut être efficace auprès d'individus porteurs d'un TDIL. Enfin, ce travail vient questionner la possibilité d'entraîner les fonctions cognitives dans le TDIL sur le terrain, avec la question d'une méthode collective ou individualisée, la question du type d'outils adéquats et la question de l'entraînement ou la mise en place de stratégies de compensation basées sur les ressources de l'individu. Ces données fournissent ainsi des pistes de réflexion et de compréhension aux professionnels de santé tant dans l'évaluation, le diagnostic et l'accompagnement de cette population spécifique.

Références

- Albinet, C. (2015). Processing Speed. *The encyclopedia of adulthood and aging* (p. 1-4).
<https://doi.org/10.1002/9781118521373.wbeaa242>
- Albinet, C. T., Boucard, G., Bouquet, C. A., & Audiffren, M. (2012). Processing speed and executive functions in cognitive aging : How to disentangle their mutual relationship? *Brain and Cognition*, 79(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2012.02.001>
- Anderson, V. A., Anderson, P., Northam, E., Jacobs, R., & Catroppa, C. (2001). Development of executive functions through late childhood and adolescence in an Australian sample. *Developmental Neuropsychology*, 20(1), 385-406.
https://doi.org/10.1207/S15326942DN2001_5
- Ardila, A., Pineda, D., & Rosselli, M. (2000). Correlation Between Intelligence Test Scores and Executive Function Measures. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 15(1), 31-36. [https://doi.org/PII S0887-6177\(98\)00159-0](https://doi.org/PII S0887-6177(98)00159-0)
- Arffa, S. (2007). The relationship of intelligence to executive function and non-executive function measures in a sample of average, above average, and gifted youth. *Archives of Clinical Neuropsychology: The Official Journal of the National Academy of Neuropsychologists*, 22(8), 969-978. <https://doi.org/10.1016/j.acn.2007.08.001>
- Arvidsson, P., & Granlund, M. (2018). The Relationship Between Intelligence Quotient and Aspects of Everyday Functioning and Participation for People Who Have Mild and Borderline Intellectual Disabilities. *Journal of Applied Research in Intellectual Disabilities: JARID*, 31(1), e68-e78. <https://doi.org/10.1111/jar.12314>
- Baddeley, A. (1986). Working memory (p. xi, 289). Clarendon Press/Oxford University Press.
- Barkley, R. A., Murphy, K. R., & Bush, T. (2001). Time perception and reproduction in young adults with attention deficit hyperactivity disorder. *Neuropsychology*, 15(3), 351-360.
<https://doi.org/10.1037//0894-4105.15.3.351>
- Barreau, H. (2009). *Le temps*. Presses Universitaires de France.
- Baudouin, A., Vanneste, S., Pouthas, V., & Isingrini, M. (2006). Age-related changes in duration reproduction : Involvement of working memory processes. *Brain and cognition*, 62, 17-23. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2006.03.003>
- Baurain, C., & Nader-Grosbois, N. (2013). Theory of mind, socio-emotional problem-solving, socio-emotional regulation in children with intellectual disability and in typically

- developing children. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 43(5), 1080-1097. <https://doi.org/10.1007/s10803-012-1651-4>
- Bechara, A., Damasio, H., & Damasio, A. R. (2000). Emotion, Decision Making and the Orbitofrontal Cortex. *Cerebral Cortex*, 10(3), 295-307. <https://doi.org/10.1093/cercor/10.3.295>
- Bechara, Tranel, D., & Damasio, H. (2000). Characterization of the decision-making deficit of patients with ventromedial prefrontal cortex lesions. *Brain: a journal of neurology*, 123(), 2189-2202. <https://doi.org/10.1093/brain/123.11.2189>
- Belacchi, C., Carretti, B., & Cornoldi, C. (2010). The role of working memory and updating in Coloured Raven Matrices performance in typically developing children. *European Journal of Cognitive Psychology*, 22(7), 1010-1020. <https://doi.org/10.1080/09541440903184617>
- Bellaj, T., & Seron, X. (2013). Les facteurs culturels dans l'évaluation neuropsychologique. In book: *Traité de neuropsychologie clinique de l'adulte, 2ème édition*, (pp.641-658)
- Best, J. R., & Miller, P. H. (2010). A Developmental Perspective on Executive Function. *Child development*, 81(6), 1641-1660. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2010.01499.x>
- Bexkens, A., Jansen, B. R. J., Van der Molen, M. W., & Huizenga, H. M. (2016). Cool Decision-Making in Adolescents with Behavior Disorder and/or Mild-to-Borderline Intellectual Disability. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 44(2), 357-367. <https://doi.org/10.1007/s10802-015-9996-8>
- Bexkens, A., Van der Molen, M. W., Collot d'Escury-Koenigs, A. M. L., & Huizenga, H. M. (2014). Interference control in adolescents with mild-to-borderline intellectual disabilities and/or behavior disorders. *Child Neuropsychology: A Journal on Normal and Abnormal Development in Childhood and Adolescence*, 20(4), 398-414. <https://doi.org/10.1080/09297049.2013.799643>
- Biesmans, K. E., van Aken, L., Frunt, E. M. J., Wingbermühle, P. A. M., & Egger, J. I. M. (2019). Inhibition, shifting and updating in relation to psychometric intelligence across ability groups in the psychiatric population: Executive function and intelligence. *Journal of Intellectual Disability Research*, 63(2), 149-160. <https://doi.org/10.1111/jir.12559>
- Binet, A., & Simon, T. (1908). Le développement de l'intelligence chez les enfants. *L'Année psychologique*, 14, 1-95.

- Block, R. A., Hancock, P. A., & Zakay, D. (2010). How cognitive load affects duration judgments : A meta-analytic review. *Acta Psychologica*, *134*(3), 330-343. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2010.03.006>
- Block, R. A., & Zakay, D. (1997). Prospective and retrospective duration judgments : A meta-analytic review. *Psychonomic Bulletin & Review*, *4*(2), 184-197. <https://doi.org/10.3758/BF03209393>
- Bobin-Bègue, A., Provasi, J., Marks, A., & Pouthas, V. (2006). Influence of auditory tempo on the endogenous rhythm of non-nutritive sucking. *European Review of Applied Psychology*, *56*(4), 239-245. <https://doi.org/10.1016/j.erap.2005.09.006>
- Boyd, T. M., & Sautter, S. W. (1993). Route-finding : A measure of everyday executive functioning in the head-injured adult. *Applied Cognitive Psychology*, *7*(2), 171-181. <https://doi.org/10.1002/acp.2350070208>
- Brannon, E. M., Suanda, S., & Libertus, K. (2007). Temporal discrimination increases in precision over development and parallels the development of numerosity discrimination. *Developmental Science*, *10*(6), 770-777. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2007.00635.x>
- Brooks, P., Hanauer, J., Padowska, B., & Rosman, H. (2003). The role of selective attention in preschoolers' rule use in a novel dimensional card sort. *Cognitive Development*, *18*, 195-215. [https://doi.org/10.1016/S0885-2014\(03\)00020-0](https://doi.org/10.1016/S0885-2014(03)00020-0)
- Brown, S. W. (2006). Timing and executive function: Bidirectional interference between concurrent temporal production and randomization tasks. *Memory & Cognition*, *34*(7), 1464-1471. <https://doi.org/10.3758/BF03195911>
- Brown, S. W., Collier, S. A., & Night, J. C. (2013). Timing and executive resources: Dual-task interference patterns between temporal production and shifting, updating, and inhibition tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *39*(4), 947-963. <https://doi.org/10.1037/a0030484>
- Brown, S. W., & Perreault, S. T. (2017). Relation between temporal perception and inhibitory control in the Go/No-Go task. *Acta Psychologica*, *173*, 87-93. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2016.12.004>
- Büchel, F. P., & Paour, J.-L. (2005). Déficience intellectuelle : Déficits et remédiation cognitive. *Enfance*, *Vol. 57*(3), 227-240.
- Burgess, G. C., Braver, T. S., & Gray, J. R. (2006). Exactly how are fluid intelligence, working memory, and executive function related? Cognitive neuroscience approaches to

- investigating the mechanisms of fluid cognition. *Behavioral and Brain Sciences*, 29(2), 128-129. <https://doi.org/10.1017/S0140525X0625903X>
- Bussy, G., de Freminville, B., & Touraine, R. (2016). Rééducation cognitive de la déficience intellectuelle : Possibilités et limites. *ANAE : Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant*, 141 vol 28, 225-231.
- Canton, M. (2017). *Fonctions exécutives chez les enfants atteints de phénylcétonurie* [Thèse de doctorat, Angers]. <https://theses.fr/2017ANGE0024>
- Carlson, S. M. (2005). Developmentally sensitive measures of executive function in preschool children. *Developmental Neuropsychology*, 28(2), 595-616. https://doi.org/10.1207/s15326942dn2802_3
- Carlson, S. M., & Moses, L. J. (2001). Individual differences in inhibitory control and children's theory of mind. *Child Development*, 72(4), 1032-1053. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00333>
- Carretti, B., Belacchi, C., & Cornoldi, C. (2010). Difficulties in working memory updating in individuals with intellectual disability. *Journal of Intellectual Disability Research*, 54(4), 337-345. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2788.2010.01267.x>
- Carriedo, N., Corral, A., Montoro, P. R., Herrero, L., & Rucián, M. (2016). Development of the updating executive function: From 7-year-olds to young adults. *Developmental Psychology*, 52(4), 666-678. <https://doi.org/10.1037/dev0000091>
- Chevalier, N. (2010). Les fonctions exécutives chez l'enfant : Concepts et développement. *Canadian Psychology/Psychologie canadienne*, 51(3), 149-163. <https://doi.org/10.1037/a0020031>
- Chevignard, M., Taillefer, C., Picq, C., & Pradat-Diehl, P. (2008). Évaluation écologique des fonctions exécutives chez un patient traumatisé crânien. *Annales de Réadaptation et de Médecine Physique*, 51(2), 74-83. <https://doi.org/10.1016/j.annrmp.2007.10.008>
- Church, R. M., & Gibbon, J. (1982). Temporal generalization. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 8(2), 165-186. <https://doi.org/10.1037/0097-7403.8.2.165>
- Cianchetti, C., Corona, S., Foscoliano, M., Contu, D., & Sannio-Fancello, G. (2007). Modified Wisconsin Card Sorting Test (MCST, MWCST) : Normative Data in Children 4–13 Years Old, According to Classical and New Types of Scoring. *The Clinical neuropsychologist*, 21, 456-478. <https://doi.org/10.1080/13854040600629766>
- Conklin, H. M., Luciana, M., Hooper, C. J., & Yarger, R. S. (2007). Working memory performance in typically developing children and adolescents: Behavioral evidence of

- protracted frontal lobe development. *Developmental Neuropsychology*, 31(1), 103-128. https://doi.org/10.1207/s15326942dn3101_6
- Courbois, Y. (2016). Déficiences intellectuelles. Approches cognitives et développementales. In book: *Inserm. Déficiences intellectuelles. Collection Expertise collective*, EDP Sciences.
- Crone, E. A., Wendelken, C., Donohue, S., van Leijenhorst, L., & Bunge, S. A. (2006). Neurocognitive development of the ability to manipulate information in working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(24), 9315-9320. <https://doi.org/10.1073/pnas.0510088103>
- Danielsson, H., Henry, L., Messer, D., & Rönnerberg, J. (2012). Strengths and weaknesses in executive functioning in children with intellectual disability. *Research in Developmental Disabilities*, 33(2), 600-607. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.11.004>
- Danielsson, H., Zottarel, V., Palmqvist, L., & Lanfranchi, S. (2015). The effectiveness of working memory training with individuals with intellectual disabilities—A meta-analytic review. *Frontiers in Psychology*, 6, 1230. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01230>
- David, M., Dieterich, K., Billette de Villemeur, A., Jouk, P.-S., Counillon, J., Larroque, B., Bloch, J., & Cans, C. (2014). Prevalence and characteristics of children with mild intellectual disability in a French county. *Journal of Intellectual Disability Research: JIDR*, 58(7), 591-602. <https://doi.org/10.1111/jir.12057>
- Davidson, M. C., Amso, D., Anderson, L. C., & Diamond, A. (2006). Development of cognitive control and executive functions from 4 to 13 years: Evidence from manipulations of memory, inhibition, and task switching. *Neuropsychologia*, 44(11), 2037-2078. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.02.006>
- Deary, I. J., Strand, S., Smith, P., & Fernandes, C. (2007). Intelligence and educational achievement. *Intelligence*, 35, 13-21. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2006.02.001>
- Deforge, H. (2011). Prise en charge des troubles attentionnels et exécutifs chez l'enfant. La remédiation cognitive: Pratiques et perspectives. *Développements*, 8(2), 5-20. <https://doi.org/10.3917/devel.008.0005>
- de Hevia, M. D., Izard, V., Coubart, A., Spelke, E. S., & Streri, A. (2014). Representations of space, time, and number in neonates. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(13), 4809-4813. <https://doi.org/10.1073/pnas.1323628111>

- Demetriou, A., Christou, C., Spanoudis, G., & Platsidou, M. (2002). The development of mental processing : Efficiency, working memory, and thinking. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 67, 1.
- Demeyer, F., De Pue, S., Aben, B., Verhaegen, K., Meijer, A.-M., Gillebert, C., & Van den Bussche, E. (2023). *Miyake revisited: The development of an open-source cognitive control test battery*. <https://doi.org/10.31234/osf.io/2rc3v>
- Dennis, M. (2006). Prefrontal cortex : Typical and atypical development. *The Frontal Lobes: Development, Function, and Pathology*, 128-162.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511545917.007>
- Diamond, A. (2013). Executive Functions. *Annual review of psychology*, 64, 135-168.
<https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>
- Doebel, S. (2020). Rethinking Executive Function and Its Development. *Perspectives on Psychological Science: A Journal of the Association for Psychological Science*, 15(4), 942-956. <https://doi.org/10.1177/1745691620904771>
- Doebel, S., & Zelazo, P. D. (2013). Bottom-up and top-down dynamics in young children's executive function : Labels aid 3-year-olds' performance on the Dimensional Change Card Sort. *Cognitive Development*, 28(3), 222-232.
<https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2012.12.001>
- Droit-Volet, S. (1998). Time Estimation in Young Children : An Initial Force Rule Governing Time Production. *Journal of Experimental Child Psychology*, 68(3), 236-249.
<https://doi.org/10.1006/jecp.1997.2430>
- Droit-Volet, S. (2000). L'estimation du temps : Perspective développementale. *L'Année psychologique*, 100(3), 443-464. <https://doi.org/10.3406/psy.2000.28653>
- Droit-Volet, S. (2001). Les différentes facettes du temps. *Enfances & Psy*, 13(1), 26.
<https://doi.org/10.3917/ep.013.0026>
- Droit-Volet, S. (2010). Stop using time reproduction tasks in a comparative perspective without further analyses of the role of the motor response : The example of children. *European Journal of Cognitive Psychology*, 22(1), 130-148.
<https://doi.org/10.1080/09541440902738900>
- Droit-Volet, S. (2013). Time perception in children: A neurodevelopmental approach. *Neuropsychologia*, 51(2), 220-234.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.09.023>
- Droit-Volet, S. (2016). Development of time. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 8, 102-109. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.02.003>

- Droit-Volet, S. (2022). *Perception et représentation du temps : Perspective historique*. 14(4), 233-243. <https://doi.org/10.1684/nrp.2022.0726>.
- Droit-Volet, S., Clément, A., & Wearden, J. (2001). Temporal Generalization in 3- to 8-Year-Old Children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 80(3), 271-288. <https://doi.org/10.1006/jecp.2001.2629>
- Droit-Volet, S., & Gautier, T. (2000). Time estimation in young children as a function of instructions and response type. *Cahiers de psychologie cognitive*, 19(3), 263-276.
- Droit-Volet, S., & Hallez, Q. (2019). Differences in modal distortion in time perception due to working memory capacity : A response with a developmental study in children and adults. *Psychological Research*, 83(7), 1496-1505. <https://doi.org/10.1007/s00426-018-1016-5>
- Droit-Volet, S., Meck, W. H., & Penney, T. B. (2007). Sensory modality and time perception in children and adults. *Behavioural Processes*, 74(2), 244-250. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2006.09.012>
- Droit-Volet, S., & Monier, F. (2024). L'enfant et le temps. *Enfances & Psy*, 100(2), 27-39. <https://doi.org/10.3917/ep.100.0027>
- Droit-Volet, S., & Rattat, A.-C. (1999). Are Time and Action Dissociated in Young Children's Time Estimation? *Cognitive Development*, 14(4), 573-595. [https://doi.org/10.1016/S0885-2014\(99\)00020-9](https://doi.org/10.1016/S0885-2014(99)00020-9)
- Droit-Volet, S., & Wearden, J. (2003). Les modèles d'horloge interne en psychologie du temps. *L'Année psychologique*, 103(4), 617-654. <https://doi.org/10.3406/psy.2003.29656>
- Droit-Volet, S., & Wearden, J. H. (2001). Temporal Bisection in Children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 80(2), 142-159. <https://doi.org/10.1006/jecp.2001.2631>
- Droit-Volet, S., Wearden, J. H., & Zélanti, P. S. (2015). Cognitive abilities required in time judgment depending on the temporal tasks used: A comparison of children and adults. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 68(11), 2216-2242. <https://doi.org/10.1080/17470218.2015.1012087>
- Droit-Volet, S., & Zélanti, P. S. (2013). Development of Time Sensitivity and Information Processing Speed. *Plos One*, 8(8), e71424. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071424>
- Droit-Volet, S., Zélanti, P. S., Dellatolas, G., Kieffer, V., El Massioui, N., Brown, B. L., Doyère, V., Provasi, J., & Grill, J. (2013). Time perception in children treated for a

- cerebellar medulloblastoma. *Research in Developmental Disabilities*, 34(1), 480-494.
<https://doi.org/10.1016/j.ridd.2012.09.006>
- Einstein, A. (1905). The special theory of relativity. *Ann Phys*, 17, 891-921.
- Erostarbe-Pérez, M., Reparaz-Abaitua, C., Martínez-Pérez, L., & Magallón-Recalde, S. (2022). Executive functions and their relationship with intellectual capacity and age in schoolchildren with intellectual disability. *Journal of Intellectual Disability Research*, 66(1-2), 50-67. <https://doi.org/10.1111/jir.12885>
- Er-Rafiqi, M., Roukoz, C., Gall, D. L., & Roy, A. (2017). Les fonctions exécutives chez l'enfant : Développement, influences culturelles et perspectives cliniques. *Revue de neuropsychologie*, Volume 9(1), 27-34.
- Fagot, B. I., & Gauvain, M. (1997). Mother-child problem solving: Continuity through the early childhood years. *Developmental Psychology*, 33(3), 480-488.
<https://doi.org/10.1037//0012-1649.33.3.480>
- Fiasse, C., & Nader-Grosbois, N. (2012). Perceived social acceptance, theory of mind and social adjustment in children with intellectual disabilities. *Research in Developmental Disabilities*, 33(6), 1871-1880. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2012.05.017>
- Finkel, D., Reynolds, C. A., McArdle, J. J., & Pedersen, N. L. (2005). The longitudinal relationship between processing speed and cognitive ability: Genetic and environmental influences. *Behavior Genetics*, 35(5), 535-549.
<https://doi.org/10.1007/s10519-005-3281-5>
- Fisk, J. E., & Sharp, C. A. (2004). Age-Related Impairment in Executive Functioning: Updating, Inhibition, Shifting, and Access. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 26(7), 874-890. <https://doi.org/10.1080/13803390490510680>
- Fortin, C., Schweickert, R., Gaudreault, R., & Viau-Quesnel, C. (2010). Timing is affected by demands in memory search but not by task switching. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 36(3), 580-595.
<https://doi.org/10.1037/a0017639>
- Fourneret, P., & des Portes, V. (2017). Approche développementale des fonctions exécutives : Du bébé à l'adolescence. *Archives de Pédiatrie*, 24(1), 66-72.
<https://doi.org/10.1016/j.arcped.2016.10.003>
- Fraisse, P. (1963). The psychology of time (p. 343). Harper & Row.
- Friedman, N. P., & Miyake, A. (2017). Unity and diversity of executive functions: Individual differences as a window on cognitive structure. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 86, 186-204.

<https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.04.023>

- Friedman, N. P., Miyake, A., Corley, R. P., Young, S. E., Defries, J. C., & Hewitt, J. K. (2006). Not all executive functions are related to intelligence. *Psychological Science*, 17(2), 172-179. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01681.x>
- Friedman, N. P., Miyake, A., Young, S. E., DeFries, J. C., Corley, R. P., & Hewitt, J. K. (2008). Individual differences in executive functions are almost entirely genetic in origin. *Journal of Experimental Psychology: General*, 137(2), 201-225. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.137.2.201>
- Friedman, W. J. (1982). *The Developmental Psychology of Time*. Academic Press Inc.
- Gabler, N. B., Duan, N., Vohra, S., & Kravitz, R. L. (2011). N-of-1 trials in the medical literature : A systematic review. *Medical Care*, 49(8), 761-768. <https://doi.org/10.1097/MLR.0b013e318215d90d>
- Garon, N., Bryson, S. E., & Smith, I. M. (2008). Executive function in preschoolers: A review using an integrative framework. *Psychological Bulletin*, 134(1), 31-60. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.134.1.31>
- Gathercole, S. E. (1998). The development of memory. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 39(1), 3-27. <https://doi.org/10.1017/S0021963097001753>
- Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Knight, C., & Stegmann, Z. (2004). Working Memory Skills and Educational Attainment: Evidence from National Curriculum Assessments at 7 and 14 Years of Age. *Applied Cognitive Psychology*, 18, 1-16. <https://doi.org/10.1002/acp.934>
- Gautier, T., & Droit-Volet, S. (2002). Attention and time estimation in 5- and 8-year-old children: A dual task procedure. *Behavioural Processes*, 58(1-2), 57-66. [https://doi.org/10.1016/S0376-6357\(02\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0376-6357(02)00002-5)
- Gawrylowicz, J., Gabbert, F., Carson, D., Lindsay, W. R., & Hancock, P. J. B. (2012). Holistic Versus Featural Facial Composite Systems for People with Mild Intellectual Disabilities. *Applied Cognitive Psychology*, 26(5), 716-720. <https://doi.org/10.1002/acp.2850>
- Gawrylowicz, J., Gabbert, F., Carson, D., Lindsay, W. R., & Hancock, P. J. B. (2013). Face Recognition and Description Abilities in People with Mild Intellectual Disabilities. *Journal of Applied Research in Intellectual Disabilities*, 26(5), 435-446. <https://doi.org/10.1111/jar.12028>

- Gerstadt, C. L., Hong, Y. J., & Diamond, A. (1994). The relationship between cognition and action : Performance of children 3 1/2-7 years old on a Stroop-like day-night test. *Cognition*, 53(2), 129-153. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(94\)90068-x](https://doi.org/10.1016/0010-0277(94)90068-x)
- Gibbon, J. (1977). Scalar expectancy theory and Weber's law in animal timing. *Psychological Review*, 84(3), 279-325. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.84.3.279>
- Gibbon, J., Church, R. M., & Meck, W. H. (1984). Scalar Timing in Memory. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 423, 52-77. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1984.tb23417.x>
- Gligorović, M., & Buha Đurović, N. (2014). Inhibitory control and adaptive behaviour in children with mild intellectual disability. *Journal of Intellectual Disability Research*, 58(3), 233-242. <https://doi.org/10.1111/jir.12000>
- Gligorović, M., & Buha, N. (2013). Conceptual abilities of children with mild intellectual disability : Analysis of Wisconsin Card Sorting Test performance. *Journal of Intellectual & Developmental Disability*, 38(2), 134-140. <https://doi.org/10.3109/13668250.2013.772956>
- Gourlat, E., Rattat, A.-C., & Albinet, C. T. (2024). Vers une meilleure compréhension du trouble du développement intellectuel léger idiopathique : Des symptômes aux modalités d'accompagnement. *Psychologie Française*.
- Gourlat, E., Rattat, A.-C., Valéry, B., & Albinet, C. (2023). Deficits of Duration Estimation in Individuals aged 10 to 20 Years Old with Idiopathic Mild Intellectual Disability: The Role of Updating Working Memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 77(9), 1883-1897.
- Grada, C., & Simoni, E. (2018). Inhibitory Control of Attention: Difference versus Developmental Theory. Findings in Mild Intellectual Disability and ADHD. *Journal of Childhood & Developmental Disorders*, 04(04). <https://doi.org/10.4172/2472-1786.100076>
- Graham, J. E., Karmarkar, A. M., & Ottenbacher, K. J. (2012). Small sample research designs for evidence-based rehabilitation: Issues and methods. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 93(8 Suppl), 111-116. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2011.12.017>
- Gresham, F. M., & MacMillan, D. L. (1997). Social competence and affective characteristics of students with mild disabilities. *Review of Educational Research*, 67(4), 377-415. <https://doi.org/10.2307/1170514>

- Guopeng, C., Yue, J., & Dasen, L. (2007). An experimental research study on working memory and processing speed of children of mild mental retardation. *Psychological Science (China)*, 30(3), 564-568.
- Gygi, J. T., Hagmann-von Arx, P., Schweizer, F., & Grob, A. (2017). The Predictive Validity of Four Intelligence Tests for School Grades: A Small Sample Longitudinal Study. *Frontiers in Psychology*, 8, 375.
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2017.00375>
- Haldemann, J., Stauffer, C., Troche, S., & Rammsayer, T. (2012). Performance on auditory and visual temporal information processing is related to psychometric intelligence. *Personality and Individual Differences*, 52(1), 9-14.
<https://doi.org/10.1016/j.paid.2011.08.032>
- Hale, S. (2008). A Global Developmental Trend in Cognitive Processing Speed. *Child Development*, 61, 653-663. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.1990.tb02809.x>
- Hallez. (2022). Development of time perception in children. In Shankland, *Anglais pour Psychologue*. Dunod.
- Hallez, Q. (2020). Développement, temps et attention : Comportements et modélisation. *Bulletin de psychologie*, Numéro 566(2), 133-136.
<https://doi.org/10.3917/bupsy.566.0133>
- Hallez, Q., Damsma, A., Rhodes, D., van Rijn, H., & Droit-Volet, S. (2019). The dynamic effect of context on interval timing in children and adults. *Acta Psychologica*, 192, 87-93. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2018.10.004>
- Hallez, Q., & Droit-Volet, S. (2017). High levels of time contraction in young children in dual tasks are related to their limited attention capacities. *Journal of Experimental Child Psychology*, 161, 148-160. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2017.04.013>
- Hegeland, E. R., Flensburg-Madsen, T., Dammeyer, J., & Mortensen, E. L. (2018). Low IQ as a predictor of unsuccessful educational and occupational achievement: A register-based study of 1,098,742 men in Denmark 1968–2016. *Intelligence*, 71, 46-53.
<https://doi.org/10.1016/j.intell.2018.10.002>
- Henry, L. A. (2001). How does the severity of a learning disability affect working memory performance? *Memory (Hove, England)*, 9(4-6), 233-247.
<https://doi.org/10.1080/09658210042000085>
- Hessels, M., & Gassner, M. (2010). L'étude des processus cognitifs chez les personnes avec déficience intellectuelle : La remise en question de la validité de l'appariement de groupes selon l'âge mental. *Schweizerische Zeitschrift für Heilpädagogik*, 16, 37-42.

- Hessels-Schlatter, C. (2002). The Analogical Reasoning Learning Test: Theoretical and Empirical Foundation of a Diagnostic Tool for Individuals with Moderate Mental Retardation. *Journal of Cognitive Education and Psychology*, 2(2), 172-174. <https://doi.org/10.1891/194589502787383326>
- Hessels-Schlatter, C. (2006). Le développement des compétences dans le raisonnement abstrait chez les personnes présentant un retard mental modéré à sévère. *Pédagogie spécialisée*, 1, 27-31.
- Hessels-Schlatter, C., Hessels, M. G. P., & Brandon, S. (2021). Cognition, métacognition, éducation : L'approche intégrative de l'Atelier d'Apprentissage. *Raisons éducatives*, 25(1), 289.
- Holmén, J., Chaplin, W., & Del Vecchio, T. (2024). Measures of executive function may not be indicators of latent constructs. *Journal of Neuropsychology*. <https://doi.org/10.1111/jnp.12363>
- Houdé, O. (2007). Le rôle positif de l'inhibition dans le développement cognitif de l'enfant. *Le Journal des psychologues*, 244(1), 40-42. <https://doi.org/10.3917/jdp.244.0040>
- Houtkamp, E. O., van der Molen, M. J., de Voogd, E. L., Salemink, E., & Klein, A. M. (2017). The relation between social anxiety and biased interpretations in adolescents with mild intellectual disabilities. *Research in Developmental Disabilities*, 67, 94-98. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2017.06.003>
- Huizinga, M., Dolan, C. V., & van der Molen, M. W. (2006). Age-related change in executive function : Developmental trends and a latent variable analysis. *Neuropsychologia*, 44(11), 2017-2036. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.01.010>
- Huizinga, M., & van der Molen, M. W. (2007). Age-group differences in set-switching and set-maintenance on the Wisconsin Card Sorting Task. *Developmental Neuropsychology*, 31(2), 193-215. <https://doi.org/10.1080/87565640701190817>
- Inserm. (2016). *Déficiences intellectuelles*. Inserm - La science pour la santé. <https://www.inserm.fr/information-en-sante/expertises-collectives/deficiences-intellectuelles>
- Janeslätt, G., Ahlström, S. W., & Granlund, M. (2019). Intervention in time-processing ability, daily time management and autonomy in children with intellectual disabilities aged 10-17 years—A cluster randomised trial. *Australian Occupational Therapy Journal*, 66(1), 110-120. <https://doi.org/10.1111/1440-1630.12547>

- Janeslätt, G., Granlund, M., Alderman, I., & Kottorp, A. (2008). Development of a new assessment of time processing ability in children, using Rasch analysis. *Child: care, health and development*, 34, 771-780.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2214.2008.00865.x>
- Janeslätt, G., Granlund, M., & Kottorp, A. (2009). Measurement of time processing ability and daily time management in children with disabilities. *Disability and Health Journal*, 2(1), 15-19. <https://doi.org/10.1016/j.dhjo.2008.09.002>
- Janeslätt, G., Granlund, M., Kottorp, A., & Almqvist, L. (2010). Patterns of Time Processing Ability in Children with and without Developmental Disabilities. *Journal of Applied Research in Intellectual Disabilities*, 23(3), 250-262. <https://doi.org/10.1111/j.1468-3148.2009.00528.x>
- Jensen, A. R. (1982). Reaction Time and Psychometric g. In H. J. Eysenck (Éd.), *A Model for Intelligence* (p. 93-132). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-68664-1_4
- Jensen, A. R. (2006). *Clocking the Mind: Mental Chronometry and Individual Differences*. Elsevier.
- Kail, R. (1991). Development of Processing Speed in Childhood and Adolescence. In H. W. Reese (Éd.), *Advances in Child Development and Behavior* (Vol. 23, p. 151-185). JAI. [https://doi.org/10.1016/S0065-2407\(08\)60025-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2407(08)60025-7)
- Kail, R. (1992). General slowing of information-processing by persons with mental retardation. *American Journal of Mental Retardation: AJMR*, 97(3), 333-341.
- Kail, R. (2000). Speed of Information Processing. *Journal of School Psychology - L*, 38, 51-61. [https://doi.org/10.1016/S0022-4405\(99\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0022-4405(99)00036-9)
- Kail, R., & Salthouse, T. A. (1994). Processing speed as a mental capacity. *Acta Psychologica*, 86(2-3), 199-225. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(94\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0001-6918(94)90003-5)
- Kail, R. V. (2007). Longitudinal evidence that increases in processing speed and working memory enhance children's reasoning. *Psychological Science*, 18(4), 312-313. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2007.01895.x>
- Kail, R. V., Lervåg, A., & Hulme, C. (2016). Longitudinal Evidence Linking Processing Speed to the Development of Reasoning. *Developmental science*, 19(6), 1067-1074. <https://doi.org/10.1111/desc.12352>
- Karr, J. E., Areshenkoff, C. N., Rast, P., Hofer, S. M., Iverson, G. L., & Garcia-Barrera, M. A. (2018). The unity and diversity of executive functions: A systematic review and re-analysis of latent variable studies. *Psychological Bulletin*, 144(11), 1147-1185. <https://doi.org/10.1037/bul0000160>

- Keys, B. A., & White, D. A. (2000). Exploring the relationship between age, executive abilities, and psychomotor speed. *Journal of the International Neuropsychological Society: JINS*, 6(1), 76-82. <https://doi.org/10.1017/s1355617700611098>
- Killeen, P. R., & Weiss, N. A. (1987). Optimal timing and the Weber function. *Psychological Review*, 94(4), 455-468. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.94.4.455>
- Kiresuk, T. J., & Sherman, R. E. (1968). Goal attainment scaling: A general method for evaluating comprehensive community mental health programs. *Community Mental Health Journal*, 4(6), 443-453. <https://doi.org/10.1007/BF01530764>
- Kitamura, Y., Okumura, Y., Shirakawa, Y., Ikeda, Y., & Kita, Y. (2022). Characteristics of shifting ability in children with mild intellectual disabilities: An experimental study with a task-switching paradigm. *Journal of Intellectual Disability Research*, 66(11), 853-864. <https://doi.org/10.1111/jir.12974>
- Kok, L., van der Waa, A., Klip, H., & Staal, W. (2016). The effectiveness of psychosocial interventions for children with a psychiatric disorder and mild intellectual disability to borderline intellectual functioning: A systematic literature review and meta-analysis. *Clinical Child Psychology and Psychiatry*, 21(1), 156-171. <https://doi.org/10.1177/1359104514567579>
- Kooji, J. J. S., Francken, M. H., Bron, T. I., & Wynchank, D. (2021). Young Diva-5. Diva Foundation.
- Korkman, M., Kemp, S. L., & Kirk, U. (2001). Effects of age on neurocognitive measures of children ages 5 to 12: A cross-sectional study on 800 children from the United States. *Developmental Neuropsychology*, 20(1), 331-354. https://doi.org/10.1207/S15326942DN2001_2
- Koslowski, N., Klein, K., Arnold, K., Kösters, M., Schützwohl, M., Salize, H. J., & Puschner, B. (2016). Effectiveness of interventions for adults with mild to moderate intellectual disabilities and mental health problems: Systematic review and meta-analysis. *British Journal of Psychiatry*, 209(6), 469-474. <https://doi.org/10.1192/bjp.bp.114.162313>
- Krasny-Pacini, A., & Evans, J. (2018). Single-case experimental designs to assess intervention effectiveness in rehabilitation: A practical guide. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 61(3), 164-179. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2017.12.002>
- Lane, J. D., & Gast, D. L. (2014). Visual analysis in single case experimental design studies: Brief review and guidelines. *Neuropsychological Rehabilitation*, 24(3-4), 445-463. <https://doi.org/10.1080/09602011.2013.815636>

- Le Thiec, F., Jokic, C., Enot-Joyeux, F., Durand, M., Lechevalier, B., & Eustache, F. (1999). Évaluation écologique des fonctions exécutives chez les traumatisés crâniens graves : Pour une meilleure approche du handicap. *Annales de Réadaptation et de Médecine Physique*, 42(1), 1-18. [https://doi.org/10.1016/S0168-6054\(99\)80030-0](https://doi.org/10.1016/S0168-6054(99)80030-0)
- Lechuga, M. T., Moreno, V., Pelegrina, S., Gómez-Ariza, C. J., & Bajo, M. T. (2006). Age differences in memory control: Evidence from updating and retrieval-practice tasks. *Acta Psychologica*, 123, 279-298. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2006.01.006>
- Lee, K., Bull, R., & Ho, R. M. H. (2013). Developmental changes in executive functioning. *Child Development*, 84(6), 1933-1953. <https://doi.org/10.1111/cdev.12096>
- Lehto, J. E., Juujärvi, P., Kooistra, L., & Pulkkinen, L. (2003). Dimensions of executive functioning: Evidence from children. *British Journal of Developmental Psychology*, 21(1), 59-80. <https://doi.org/10.1348/026151003321164627>
- Loranger, Pepin M., Doyon M., & Blais, M.-C. (2000). Mesures de vitesse des opérations mentales chez des enfants présentant une déficience intellectuelle. *Revue francophone de la déficience intellectuelle*, Vol. 11 n° 2, 117-128.
- Luciana, M., Conklin, H. M., Hooper, C. J., & Yarger, R. S. (2005). The development of nonverbal working memory and executive control processes in adolescents. *Child Development*, 76(3), 697-712. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2005.00872.x>
- Luria, A. R. (1966). Higher cortical functions in man. Basic Books.
- Maison de l'UNESCO (2018). *Les états généraux de la déficience intellectuelle*.
- Manolov, R., & Moeyaert, M. (2017). Recommendations for Choosing Single-Case Data Analytical Techniques. *Behavior Therapy*, 48(1), 97-114. <https://doi.org/10.1016/j.beth.2016.04.008>
- Marcovitch, S., & Zelazo, P. D. (1999). The A-not-B error: Results from a logistic meta-analysis. *Child Development*, 70(6), 1297-1313. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00095>
- Mazeau, M., Pouhet, A., & Ploix Maes, E. (2021). *Neuropsychologie et Troubles des Apprentissages Chez L'enfant*. Elsevier Masson, Troisième édition. <https://doi.org/10.1016/B978-2-294-76706-7.00005-9>
- Miles, S., Howlett, C. A., Berryman, C., Nedeljkovic, M., Moseley, G. L., & Phillipou, A. (2021). Considerations for using the Wisconsin Card Sorting Test to assess cognitive flexibility. *Behavior Research Methods*, 53(5), 2083-2091. <https://doi.org/10.3758/s13428-021-01551-3>

- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The Unity and Diversity of Executive Functions and Their Contributions to Complex “Frontal Lobe” Tasks: A Latent Variable Analysis. *Cognitive Psychology*, 41(1), 49-100. <https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734>
- Monier, F., & Droit-Volet, S. (2018). Synchrony and emotion in children and adults. *International Journal of Psychology*, 53(3), 184-193. <https://doi.org/10.1002/ijop.12363>
- Morris, N., & Jones, D. M. (1990). Memory updating in working memory : The role of the central executive. *British Journal of Psychology*, 81(2), 111. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1990.tb02349.x>
- Newton, I. (1687). *Philosophiae naturalis principia mathematica* <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3363w>
- Nigg, J. T. (2000). On inhibition/disinhibition in developmental psychopathology: Views from cognitive and personality psychology and a working inhibition taxonomy. *Psychological Bulletin*, 126(2), 220-246. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.126.2.220>
- Nouwens, P. J. G., Lucas, R., Embregts, P. J. C. M., & van Nieuwenhuizen, C. (2018). In plain sight but still invisible: A structured case analysis of people with mild intellectual disability or borderline intellectual functioning. *Journal of Intellectual & Developmental Disability*, 42(1), 36-44. <https://doi.org/10.3109/13668250.2016.1178220>
- Nouwens, P. J. G., Smulders, N. B. M., Embregts, P. J. C. M., & Nieuwenhuizen, C. (2017). Meeting the support needs of persons with mild intellectual disability or borderline intellectual functioning: Still a long way to go. *Journal of Intellectual Disability Research*, 61(12), 1104-1116. <https://doi.org/10.1111/jir.12427>
- Nouwens, P. J. G., Smulders, N. B. M., Embregts, P. J. C. M., & van Nieuwenhuizen, C. (2020). Differentiating care for persons with mild intellectual disability or borderline intellectual functioning: A Delphi study on the opinions of primary and professional caregivers and scientists. *BMC Psychiatry*, 20(1), 57. <https://doi.org/10.1186/s12888-020-2437-4>
- Ogden, R., Mackenzie-Phelan, R., Montgomery, C., Fisk, J., & Wearden, J. (2019). Executive processes and timing: Comparing timing with and without reference memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 72, 174702181775186. <https://doi.org/10.1177/1747021817751869>

- Ogden, R. S., Salominaite, E., Jones, L. A., Fisk, J. E., & Montgomery, C. (2011). The role of executive functions in human prospective interval timing. *Acta Psychologica, 137*(3), 352-358. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2011.04.004>
- Ogden, R. S., Samuels, M., Simmons, F., Wearden, J., & Montgomery, C. (2018). The differential recruitment of short-term memory and executive functions during time, number, and length perception: An individual differences approach. *Quarterly Journal of Experimental Psychology (2006), 71*(3), 657-669. <https://doi.org/10.1080/17470218.2016.1271445>
- Ogden, R. S., Wearden, J. H., & Montgomery, C. (2014). The differential contribution of executive functions to temporal generalization, reproduction and verbal estimation. *Acta Psychologica, 152*, 84-94. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2014.07.014>
- Ogden, R., Wearden, J., & Jones, L. (2008). The Remembrance of Times Past: Interference in Temporal Reference Memory. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance, 34*, 1524-1544. <https://doi.org/10.1037/a0010347>
- Orsolini, M., Melogno, S., Latini, N., Penge, R., & Conforti, S. (2015). Treating verbal working memory in a boy with intellectual disability. *Frontiers in Psychology, 6*, 1091. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01091>
- Orsolini, M., Melogno, S., Scalisi, T. G., Latini, N., Caira, S., Martini, A., & Federico, F. (2019). Training Verbal Working Memory in Children with Mild Intellectual Disabilities: Effects on Problem-solving: *Psicologia Educativa, 25*(1), 1-11. <https://doi.org/10.5093/psed2018a12>
- Pelegrina, S., Lechuga, M. T., García-Madruga, J. A., Elosúa, M. R., Macizo, P., Carreiras, M., Fuentes, L. J., & Bajo, M. T. (2015). Normative data on the n-back task for children and young adolescents. *Frontiers in Psychology, 6*, 1544 <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01544>
- Pelham Jr., W. E., & Fabiano, G. A. (2008). Evidence-based psychosocial treatments for attention-deficit/hyperactivity disorder. *Journal of Clinical Child and Adolescent Psychology, 37*(1), 184-214. <https://doi.org/10.1080/15374410701818681>
- Perbal, S., Droit-Volet, S., Isingrini, M., & Pouthas, V. (2002). Relationships Between Age-Related Changes in Time Estimation and Age-Related Changes in Processing Speed, Attention, and Memory. *Aging, Neuropsychology, and Cognition, 9*(3), 201-216. <https://doi.org/10.1076/anec.9.3.201.9609>
- Perret, P. (2016). Accompagner le développement de l'intelligence : Les pratiques d'éducation et de remédiation cognitive. *Enfance, 1*(1), 85-111.

<https://doi.org/10.3917/enfl.161.0085>

- Perret, P., & Bailleux, C. (2019). Chapitre 10. Les pratiques de remédiation cognitive en psychologie développementale. In *12 interventions en psychologie du développement*, 217-237. Dunod. <https://doi.org/10.3917/dunod.brun.2019.03.0217>
- Petrides, M., & Pandya, D. N. (2002). Association pathways of the prefrontal cortex and functional observations. In *Principles of frontal lobe function*, 31-50. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195134971.003.0003>
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1966). *La psychologie de l'enfant*. Presses Universitaires de France.
- Provasi, J., Doyère, V., Zélanti, P. S., Kieffer, V., Perdry, H., El Massioui, N., Brown, B. L., Dellatolas, G., Grill, J., & Droit-Volet, S. (2014). Disrupted sensorimotor synchronization, but intact rhythm discrimination, in children treated for a cerebellar medulloblastoma. *Research in Developmental Disabilities*, 35(9), 2053-2068. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2014.04.024>
- Provasi, J., Rattat, A.-C., & Droit-Volet, S. (2011). Temporal bisection in 4-month-old infants. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 37(1), 108-113. <https://doi.org/10.1037/a0019976>
- Rabbitt, P. (1997). *Methodology of frontal and Executive Function*. Hove, UK : Psychology Press. <https://doi.org/10.4324/9780203344187>
- Rammesayer, T., & Ulrich, R. (2001). Counting models of temporal discrimination. *Psychonomic Bulletin & Review*, 8(2), 270-277. <https://doi.org/10.3758/BF03196161>
- Rattat, A., & Droit-volet, S. (2005). The Long-Term Retention of Time: A Developmental Study. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 58(2b), 163-176. <https://doi.org/10.1080/02724990444000096>
- Rattat, A.-C. (2010). Bidirectional interference between timing and concurrent memory processing in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 106(2-3), 145-162. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.02.001>
- Rattat, A.-C., & Chevalier, N. (2020). The Different Contribution of Executive Control to Temporal Comparison and Reproduction in Children and Adults. *Journal of Cognition and Development*, 1-20. <https://doi.org/10.1080/15248372.2020.1802278>
- Rattat, A.-C., & Collié, I. (2020). Duration judgments in children and adolescents with and without mild intellectual disability. *Heliyon*, 6(11), e05514. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05514>
- Rattat, A.-C., & Droit-Volet, S. (2002). Le transfert d'un apprentissage de durée d'action chez le jeune enfant : l'effet facilitateur de la variété des actions ? *Enfance*, 54(2), 141-153.

- Rattat, A.-C., & Droit-Volet, S. (2007). Implicit long-term memory for duration in young children. *European Journal of Cognitive Psychology*, *19*(2), 271-285. <https://doi.org/10.1080/09541440600834647>
- Rattat, A.-C., & Droit-Volet, S. (2012). What is the best and easiest method of preventing counting in different temporal tasks? *Behavior Research Methods*, *44*(1), 67-80. <https://doi.org/10.3758/s13428-011-0135-3>
- Reznick, J., Morrow, J., Goldman, B., & Snyder, J. (2004). The Onset of Working Memory in Infants. *Infancy*, *6*, 145-154. https://doi.org/10.1207/s15327078in0601_7
- Richard, C. (2018). *Déficiences intellectuelles. De la compréhension à la prise en charge*. De Boeck Supérieur. <https://shs.cairn.info/deficiences-intellectuelles--9782353274475?lang=fr>
- Roche, J. (2017). *Les fonctions exécutives chez les enfants et adolescents soignés pour une tumeur cérébrale : Approche clinique des perturbations en situation d'examen et de vie quotidienne* [Thèse de doctorat, Angers]. <https://theses.fr/2017ANGE0023>
- Rosales, K. P., Wong, E. H., & Looney, L. (2023). The psychometric structure of executive functions a satisfactory measurement model? An examination using meta-analysis and network modeling. *Behavioral Sciences (Basel, Switzerland)*, *13*(12), 1003. <https://doi.org/10.3390/bs13121003>
- Rose, S. A., Feldman, J. F., Jankowski, J. J., & Van Rossem, R. (2012). Information Processing from Infancy to 11 Years: Continuities and Prediction of IQ. *Intelligence*, *40*(5), 445-457. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2012.05.007>
- Roth, B., Becker, N., Romeyke, S., Schäfer, S., Domnick, F., & Spinath, F. M. (2015). Intelligence and school grades: A meta-analysis. *Intelligence*, *53*, 118-137. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2015.09.002>
- Roy, A. (2015). Approche neuropsychologique des fonctions exécutives de l'enfant : État des lieux et éléments de prospective. *Revue de neuropsychologie*, *7*(4), 245. <https://doi.org/10.3917/rne.074.0245>
- Roy, A., Besnard, J., Lancelot, C., & Gall, D. (2013). Adaptation et validation en français de l'Inventaire comportemental d'évaluation des fonctions exécutives—Version Adulte.
- Roy, A., Guerra, A., Fournet, N., Gall, D., & Roulin, J.-L. (2021). Chapitre 2 Une nouvelle batterie d'évaluation des fonctions exécutives destinée aux enfants [FÉE]: Enjeux scientifiques et cliniques., 285-324.
- Roy, A., & Lancelot, C. (2013). La prise de décision affective chez l'enfant. *Revue de neuropsychologie*, *5*, 106-118. <https://doi.org/10.3917/rne.052.0106>

- Roy, A., Le Gall, D., Roulin, J.-L., & Fournet, N. (2012). Les fonctions exécutives chez l'enfant : Approche épistémologique et sémiologie clinique. *Revue de neuropsychologie*, 4(4), 287. <https://doi.org/10.3917/rne.044.0287>
- Roy, A., Lodenos, V., Fournet, N., Le Gall, D., & Roulin, J. L. (2017). Le syndrome dysexécutif chez l'enfant : entre avancées scientifiques et questionnements. *ANAE : Approche Neuropsychologique Des Apprentissages Chez l'Enfant*, 29(146), 27-38.
- Saccuzzo, D. P., Kerr, M., Marcus, A., & Brown, R. (1979). Input capability and speed of processing in mental retardation. *Journal of Abnormal Psychology*, 88, 341-345. <https://doi.org/10.1037/0021-843X.88.4.341>
- Salthouse, T. A. (1994). The nature of the influence of speed on adult age differences in cognition. *Developmental Psychology*, 30(2), 240-259. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.30.2.240>
- Salthouse, T. A. (1996). The processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychological Review*, 103(3), 403-428. <https://doi.org/10.1037/0033-295x.103.3.403>
- Salthouse, T. A. (2005). Relations between cognitive abilities and measures of executive functioning. *Neuropsychology*, 19(4), 532-545. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.19.4.532>
- Salthouse, T. A., Atkinson, T. M., & Berish, D. E. (2003). Executive functioning as a potential mediator of age-related cognitive decline in normal adults. *Journal of Experimental Psychology. General*, 132(4), 566-594. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.132.4.566>
- Salthouse, T. A., & Kail, R. (1983). Memory development throughout the life span: The role of processing rate. In *Lift-spun devebpmnt and behavior*, 5, 89-116.
- Schuringa, H., Nieuwenhuijzen, M. van, Castro, B. O. de, & Matthys, W. (2017). Executive functions and processing speed in children with mild to borderline intellectual disabilities and externalizing behavior problems. *Child Neuropsychology*, 23(4), 442-462. <https://doi.org/10.1080/09297049.2015.1135421>
- Seguin, C., Habib, M., Krasny-Pacini, A., Lefebvre, C., Majerus, S., Peyroux, E., & Roy, A. (2018). Rééducation cognitive chez l'enfant. Apport des neurosciences, méthodologie et pratiques. De Boeck supérieur.
- Simpson, A., & Riggs, K. J. (2005). Inhibitory and working memory demands of the day-night task in children. *British Journal of Developmental Psychology*, 23(3), 471-486. <https://doi.org/10.1348/026151005X28712>

- Span, M. M., Ridderinkhof, K. R., & van der Molen, M. W. (2004). Age-related changes in the efficiency of cognitive processing across the life span. *Acta Psychologica*, *117*(2), 155-183. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2004.05.005>
- Spaniol, M., & Danielsson, H. (2022). A meta-analysis of the executive function components inhibition, shifting, and attention in intellectual disabilities. *Journal of Intellectual Disability Research*, *66*(1-2), 9-31. <https://doi.org/10.1111/jir.12878>
- Taatgen, N. A., van Rijn, H., & Anderson, J. (2007). An integrated theory of prospective time interval estimation: The role of cognition, attention, and learning. *Psychological Review*, *114*(3), 577-598. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.114.3.577>
- Tate, R. L., Perdices, M., Rosenkoetter, U., Shadish, W., Vohra, S., Barlow, D. H., Horner, R., Kazdin, A., Kratochwill, T., McDonald, S., Sampson, M., Shamseer, L., Togher, L., Albin, R., Backman, C., Douglas, J., Evans, J. J., Gast, D., Manolov, R., ... Wilson, B. (2016). The Single-Case Reporting Guideline In Behavioural Interventions. *Physical Therapy*, *96*(7), e1-e10. <https://doi.org/10.2522/ptj.2016.96.7.e1>
- Tervo-Clemmens, B., Calabro, F. J., Parr, A. C., Fedor, J., Foran, W., & Luna, B. (2023). A canonical trajectory of executive function maturation from adolescence to adulthood. *Nature Communications*, *14*(1), 6922. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42540-8>
- Theodoraki, T. E., McGeown, S. P., Rhodes, S. M., & MacPherson, S. E. (2020). Developmental changes in executive functions during adolescence: A study of inhibition, shifting, and working memory. *The British Journal of Developmental Psychology*, *38*(1), 74-89. <https://doi.org/10.1111/bjdp.12307>
- Thirion-Marissiaux, A. F., & Nader-Grosbois, N. (2008). Theory of mind and socio-affective abilities in disabled children and adolescents. *Alter*, *2*(2), 133-155.
- Tiekstra, M., Hessels, M. G. P., & Minnaert, A. E. M. G. (2009). Learning capacity in adolescents with mild intellectual disabilities. *Psychological Reports*, *105*, 804-814. <https://doi.org/10.2466/PRO.105.3.804-814>
- Trehub, S. E., Trainor, L. J., & Unyk, A. M. (1993). Music and Speech Processing in the First Year of Life. In H. W. Reese (Éd.), *Advances in Child Development and Behavior*, *24*, 1-35. [https://doi.org/10.1016/S0065-2407\(08\)60298-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2407(08)60298-0)
- Treillet, V., Jourdan-Ionescu, C., & Blanchette, I. (2014). Compréhension des émotions et inhibition chez des enfants avec ou sans déficience intellectuelle. *Revue francophone de la déficience intellectuelle*, *25*, 97-115. <https://doi.org/10.7202/1028216ar>

- Van der Linden, M., Meulemans, T., Seron, X., Coyette, F., Andres, P., & Prairial, C. (2000). L'évaluation des fonctions exécutives. *Traité de Neuropsychologie Clinique, 1*, 275-300.
- Van der Molen, M. J., Van Luit, J. E. H., Jongmans, M. J., & Van der Molen, M.-W. (2007). Verbal working memory in children with mild intellectual disabilities. *Journal of Intellectual Disability Research, 51*(2), 162-169. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2788.2006.00863.x>
- Van der Molen, M. J., Van Luit, J. E. H., Van der Molen, M. W., Klugkist, I., & Jongmans, M. J. (2010). Effectiveness of a computerized working memory training in adolescents with mild to borderline intellectual disabilities: Working memory training in M-BID. *Journal of Intellectual Disability Research, 54*(5), 433-447. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2788.2010.01285.x>
- Van der Molen, M.-J., Van Luit, J. E. H., Jongmans, M. J., & Van der Molen, M.-W. (2009). Memory profiles in children with mild intellectual disability: Strengths and weaknesses. *Research in Developmental Disabilities, 30*(6), 1237-1247. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2009.04.005>
- Van der Molen, M. J. (2010). Working memory structure in 10- and 15-year-old children with mild to borderline intellectual, disabilities. *Research in Developmental Disabilities, 31*(6), 1258-1263. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2010.07.019>
- VanMarle, K., & Wynn, K. (2006). Six-month-old infants use analog magnitudes to represent duration. *Developmental Science, 9*(5), F41-F49. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2006.00508.x>
- Van Nieuwenhuijzen, M., & Vriens, A. (2012). (Social) Cognitive skills and social information processing in children with mild to borderline intellectual disabilities. *Research in Developmental Disabilities, 33*(2), 426-434. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.09.025>
- Wearden, J. (2016). *The Psychology of Time Perception*. Palgrave Macmillan UK. <https://doi.org/10.1057/978-1-137-40883-9>
- Wearden, J. H., O'Rourke, S. C., Matchwick, C., Min, Z., & Maeers, S. (2010). Task switching and subjective duration. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 63*(3), 531-543. <https://doi.org/10.1080/17470210903024768>
- Wechsler, D. (1949). Wechsler Intelligence Scale for Children, manual.

- Zagaria, T., Antonucci, G., Buono, S., Recupero, M., & Zoccolotti, P. (2021). Executive functions and attention processes in adolescents and young adults with intellectual disability. *Brain Sciences, 11*(1), 42.
- Zakay, D. (2012). Experiencing time in daily life. *Psychologist, 25*, 578-581.
- Zélanti, P. S., & Droit-Volet, S. (2011). Cognitive abilities explaining age-related changes in time perception of short and long durations. *Journal of Experimental Child Psychology, 109*(2), 143-157. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.01.003>
- Zelazo, P. D. (2006). The Dimensional Change Card Sort (DCCS): A method of assessing executive function in children. *Nature Protocols, 1*(1), 297-301. <https://doi.org/10.1038/nprot.2006.46>
- Zelazo, P. D., & Müller, U. (2002). Executive function in typical and atypical development. *Handbook of childhood cognitive development*, 445-469. Blackwell.

Annexes

1. Tâches cognitives

1.1 Reproduction temporelle

Dans cette tâche inspirée de Droit-Volet et al., (2015), le participant doit reproduire la durée durant laquelle apparaît un cercle bleu sur l'écran de l'ordinateur. Le participant appuie sur un bouton situé sur un boîtier pour démarrer chaque essai (apparition d'un cercle bleu au centre de l'écran dont il doit reproduire la durée). Après 500 ms de délai, apparaît une croix de fixation suivie immédiatement de l'apparition du même cercle bleu. Le participant doit appuyer sur la touche pour arrêter la présentation du cercle quand il estime que sa durée est similaire à celle du stimulus cible. Sept durées différentes sont utilisées (400, 470, 530, 600, 670, 730 et 800 ms) et sont chacune présentées 6 fois. Chaque participant réalise 42 essais, 6 pour chacune des 7 durées. Les 7 durées seront randomisées à l'intérieur de chacun des 6 blocs. Les VD pour cette tâche étaient la précision et la variabilité des reproductions.



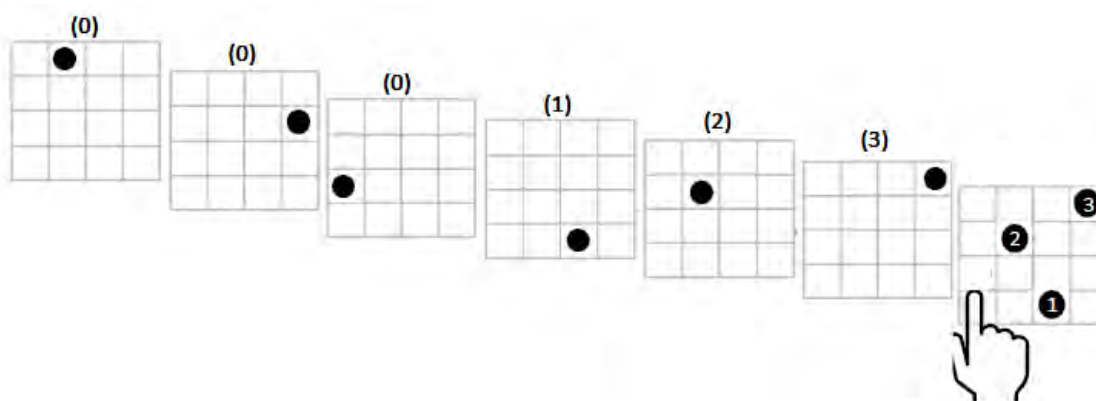
1.2 Bissection temporelle

Dans cette tâche inspirée de Droit-Volet et al., (2015), le participant doit discriminer la durée de présentation de stimuli visuels (i.e. cercles bleus), comprise entre 400 et 800 ms. Dans un premier temps, les 2 durées standard sont présentées au participant (5 fois) : courte (400 ms) et longue (800ms). Dans la phase d'apprentissage, les standards « Court » et « Long » sont présentés de manière aléatoire et le participant doit indiquer à chaque fois s'il s'agit du stimulus « Court » ou du stimulus « Long », en appuyant sur la touche correspondante du boîtier de réponse. L'apprentissage se termine après un bloc de 8 essais réussis avec zéro ou une seule erreur. Un feedback indiquant si la réponse est correcte ou incorrecte est donné après chaque réponse. Enfin, dans la phase de test les standards Court (400 ms) et Long (800 ms) ainsi que des stimuli de durées intermédiaires (470 ms, 530 ms, 600 ms, 670 ms, 730 ms) sont présentés de manière aléatoire. Le participant doit indiquer à chaque fois si la durée du cercle ressemble plus à la durée du standard « Court » ou « Long », en appuyant sur la touche correspondante. Cette phase comprend 56 essais (8 blocs de 7 essais - un essai pour chaque durée). Aucun feedback n'est donné. La VD pour cette tâche était le pourcentage de réponse long pour chaque durée.



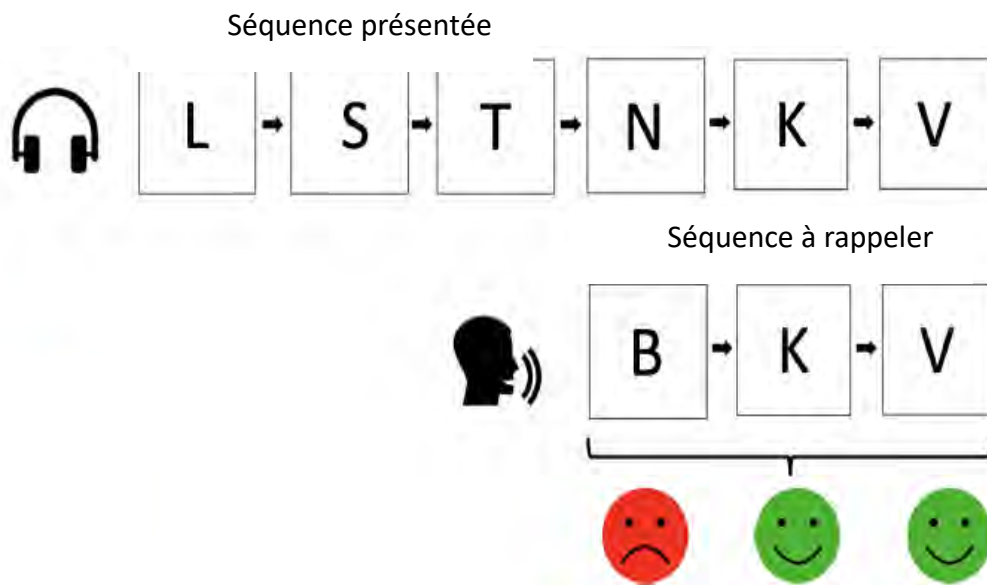
1.3 Empan dynamique spatial

Dans cette tâche adaptée d'Albinet et al. (2012), les participants étaient en présence d'un boîtier de réponse composée d'une matrice de boutons lumineux (4×4). Ces boutons de réponse lumineux s'allumaient l'un après l'autre pendant une seconde chacun, créant ainsi des séquences de différentes longueurs (six, huit, 10 ou 12). Les participants n'étaient pas informés de la longueur de chaque séquence. Il leur a été demandé de la garder en mémoire et de rappeler ensuite les trois derniers emplacements spatiaux de chaque séquence en série, en appuyant sur les boutons correspondants (rappel sériel strict vers l'avant). Aucune position spatiale n'était répétée dans la même séquence, et les éléments trop facilement identifiables (par exemple, les croix) avaient été écartés. La longueur des séquences était présentée de manière aléatoire. Après deux séquences de démonstration et quatre séquences d'entraînement (une de chaque longueur), les participants ont reçu huit séquences d'essai (deux pour chaque longueur). La VD pour cette tâche était le pourcentage de lieux spatiaux correctement rappelés dans le bon ordre.



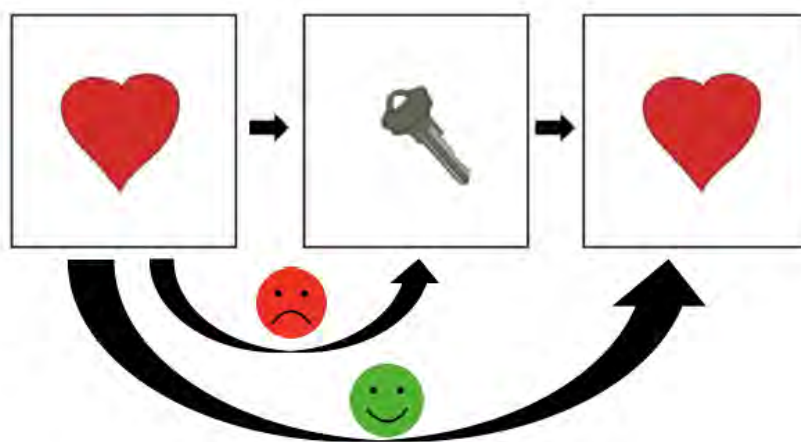
1.4 Empan dynamique verbal

Basée sur le paradigme développé par Pollack et al. (1959), cette tâche a été adaptée d'après Albinet et al. (2012). Des listes de six, huit, dix ou douze consonnes étaient énoncées à haute voix par l'expérimentateur au rythme d'une lettre toutes les deux secondes. Les participants n'étaient pas informés de la longueur de chaque liste et devaient la garder en mémoire, puis rappeler dans l'ordre les trois dernières lettres de chaque série (rappel sériel strict). Les participants donnaient leurs réponses oralement. L'expérimentateur les notait dans une grille prévue à cet effet. La longueur des séquences était présentée de manière aléatoire. Après deux listes de démonstration et quatre listes d'entraînement (une de chaque longueur), les participants ont reçu huit listes d'essai (deux pour chaque longueur). La VD pour cette tâche était le pourcentage de lettres correctement rappelées dans le bon ordre.

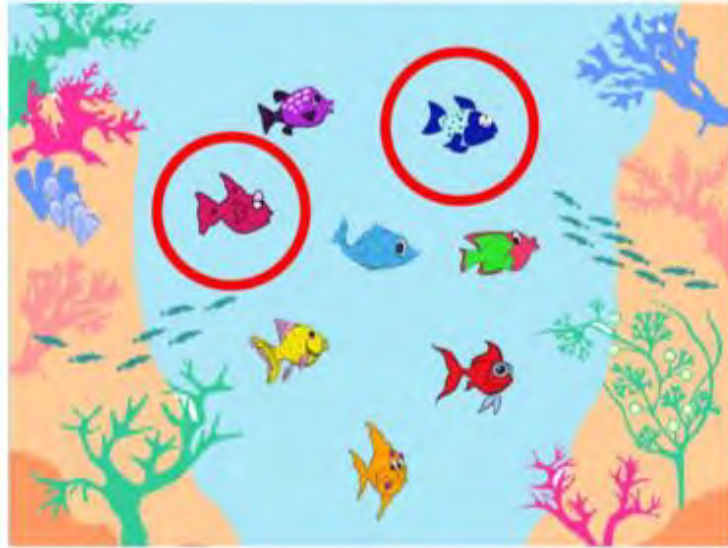


1.5 2-back

Basée sur le paradigme développé par Kirchner (1958), cette version de la tâche 2-back a été adaptée de Chevalier (2018). Dans cette version, les participants étaient confrontés à une série de 60 items (6×10 items différents) présentés dans un ordre pseudo-aléatoire. Les participants devaient identifier si l'élément actuel était identique (cible) ou différent (distracteur) de celui présenté deux essais auparavant (2-back). La tâche comprenait quatre phases : une phase de dénomination (un bloc de dix éléments), une phase de démonstration (un bloc de deux essais), une phase d'entraînement (un bloc de dix essais avec trois cibles et sept distracteurs) et une phase de test (trois blocs de 30 essais avec dix cibles et 20 distracteurs). Dans la phase de dénomination, les participants devaient nommer à haute voix les dix éléments (par exemple, bus, chat, clé, os) présentés pour s'assurer qu'ils connaissaient chacun d'entre eux. Le mot associé à chaque item était toujours composé d'une seule syllabe (par exemple, os) afin de ne pas biaiser l'évaluation de la mise à jour. Ainsi, l'empan phonologique dans la mémoire de travail était toujours le même. Si le participant faisait une erreur ou utilisait un mot de plus d'une syllabe, l'examinateur le reformulait à voix haute (par exemple, baguette au lieu de pain). L'expérimentateur a effectué la phase de démonstration. Les participants répondaient sur un boîtier réponse en appuyant sur la touche « oui » (verte) si l'élément était identique ou sur la touche « non » (rouge) si l'élément était différent. La position droite/gauche de ces touches était contrebalancée d'un participant à l'autre. La VD pour cette tâche était le nombre de réponses correctes.



1.6 Go no-Go



Dans cette tâche, adaptée de Chevalier (2014), les participants doivent appuyer sur un boîtier réponse aussi rapidement que possible lorsqu'un stimulus cible, « go » (un poisson cible) est présenté (75% des essais) et ne pas appuyer sur la touche réponse lorsque le stimulus non-cible, « no-go » (poisson entouré en rouge) apparaît à l'écran (25% des essais). Chaque participant effectue 4 séquences avec 40 stimuli. La VD pour cette tâche était le score d' de sensibilité à l'inhibition.



1.7 Multisource interference task

Dans cette tâche adaptée de Bush et Shin (2006), les participants disposent d'un clavier à 3 touches alignées qui représente les chiffres 1, 2, et 3. Des séries de trois chiffres apparaissent, toutes les 2 secondes, au centre de l'écran. Il y a toujours un chiffre différent des deux autres. Les participants devront identifier le chiffre différent et appuyer sur la touche correspondante. On distingue deux types d'essais : les essais congruents et les essais incongruents. Lors des essais congruents, le numéro cible correspond toujours à sa position sur le bouton (par exemple, le numéro "1" apparaîtrait dans la première position). Lors des essais incongruents, la cible ne correspond jamais à sa position sur le bouton de pression, et les distracteurs sont eux-mêmes des cibles potentielles (par exemple, 233, la bonne réponse est "2"). Chaque participant effectue 8 séries (4 congruentes et 4 incongruentes) de 24 essais chacun. La VD pour cette tâche était le coût d'interférence brut.

Essai congruent



Essai incongruent



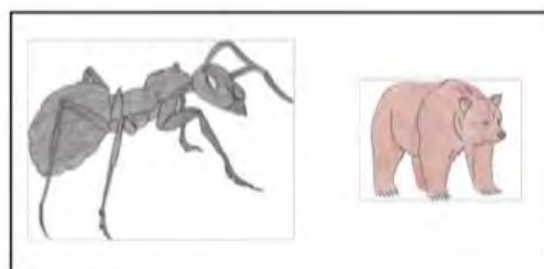
1.8 Real animal size task

Dans cette tâche adaptée de Rattat et Chevalier (2020), dans chaque essai, deux dessins d'animaux de tailles différentes (un grand et un petit) sont présentés côte à côte. Les participants sont invités à appuyer sur une touche sur un boîtier située du même côté que l'animal qui est le plus grand dans la vie réelle. Dans les essais congruents, l'animal le plus grand dans la vie réelle est visuellement plus grand à l'écran. Dans les essais incongruents : l'animal le plus grand est visuellement le plus petit, ce qui crée une interférence entre la taille réelle et la taille visuelle. Dans ces essais, les participants doivent inhiber la taille visuelle saillante afin de réagir en fonction de la taille de l'animal dans la vie réelle. La tâche comprend 48 essais expérimentaux (24 essais congruents et 24 essais incongruents) présentés dans un ordre aléatoire, avec un intervalle de 1500 ms entre les essais. La VD pour cette tâche était le coût d'interférence brut.

Essai congruent

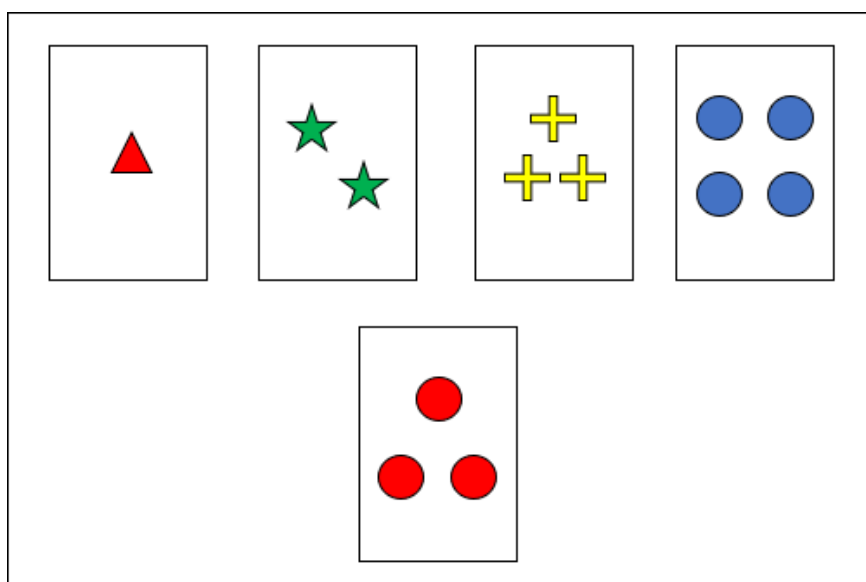


Essai incongruent



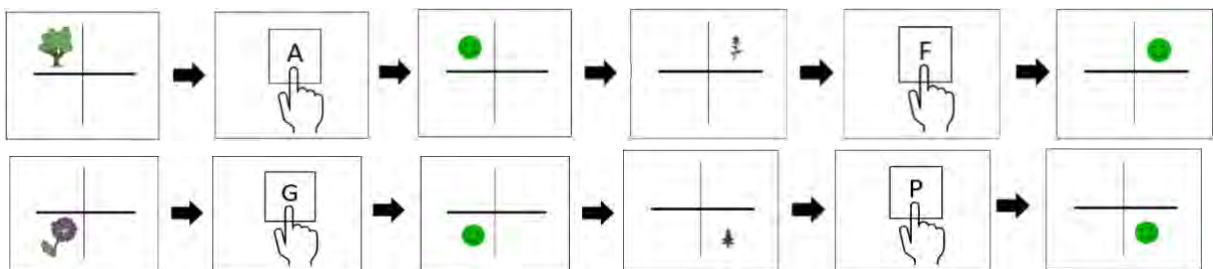
1.9 Wisconsin card sorting Test

Basée sur l'étude de Cianchetti et al. (2007), cette tâche consiste pour les participants à trier 48 cartes selon une règle (forme, couleur, nombre) qui leur permet de placer la carte sur l'écran dans l'une des 4 piles affichées. La règle de tri change après 6 catégorisations correctes (feedback pour chaque réponse), et les participants doivent alors abandonner la règle en cours pour en appliquer une autre. La performance de changement est essentiellement évaluée par les erreurs de persévération (continuer à appliquer une règle obsolète). Cette tâche ne comporte qu'une phase de test de 48 essais. Si le participant parvient à identifier les 3 critères avant la fin de la tâche, celle-ci s'arrête. Dans le cas contraire, la tâche s'arrête après les 48 essais. La VD pour cette tâche est le nombre d'erreurs persévératives.



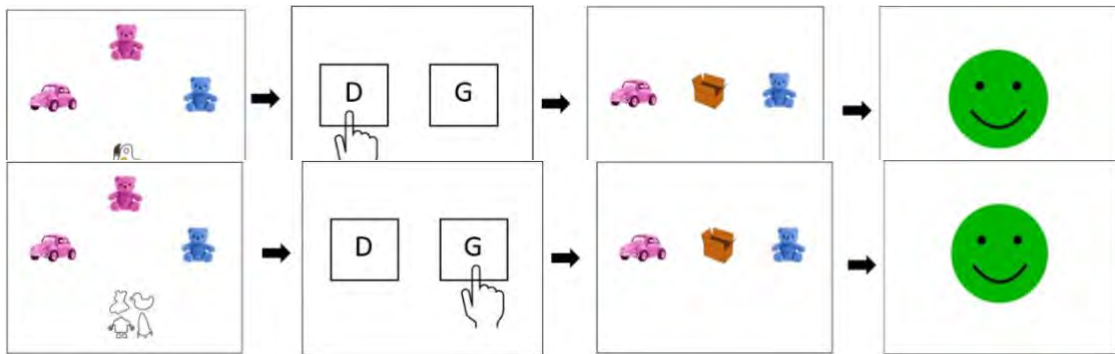
1.10 Alternating run switching task

Adaptée de l'étude de Karayanidis et al. (2013), cette tâche consiste à faire apparaître des stimuli successifs à quatre endroits différents de l'écran (en haut à droite, en haut à gauche, en bas à gauche, en bas à droite). Selon l'endroit où ils apparaissent, une règle différente doit être appliquée pour répondre. Le stimulus est une feuille ou une fleur en haut ou ; un oiseau ou un poisson en bas. Les stimuli apparaissent l'un après l'autre dans le sens des aiguilles d'une montre. Cette tâche se compose d'une phase univalente pour les végétaux (le participant est confronté uniquement aux stimuli feuille ou fleur en haut de l'écran - 2 blocs de 16 essais), d'une phase univalente pour les animaux (le participant est confronté uniquement aux stimuli oiseau ou poisson en bas de l'écran - 2 blocs de 16 essais), d'une phase bivalente pour les végétaux (le participant est confronté à tous les stimuli à tous les endroits mais ne répond qu'aux stimuli végétaux - 2 blocs de 16 essais), une phase bivalente pour les animaux (le participant est confronté à tous les stimuli dans tous les lieux mais ne répond qu'aux stimuli animaux - 2 blocs de 16 essais), et une phase mixte comprenant à la fois des stimuli bivalents pour les végétaux et les animaux (le participant est confronté à tous les stimuli dans tous les lieux et répond aux végétaux lorsqu'ils apparaissent en haut, et aux animaux lorsqu'ils apparaissent en bas - 4 blocs de 16 essais). La VD pour cette tâche est le coût de flexibilité pour les essais mixtes.



1.11 Cued task switching

Dans cette tâche adaptée de Chevalier et al. (2018), le participant se voit présenter deux jouets à trier selon leur forme (voiture ou ours en peluche) ou leur couleur (bleu ou rose). Une règle (couleur ou forme) est indiquée à l'écran et il doit ranger le jouet en fonction de celle-ci. La tâche se compose de deux phases simples le participant ne trie qu'en fonction d'une seule règle (la phase de couleur et la phase de forme) composées chacune de 2 blocs de 16 essais et d'une phase mixte composée d'essais de couleur et de forme mélangés composée de 8 blocs de 16 essais. Dans chaque phase, des feedbacks apparaissent après la réponse donnée (smiley vert ou rouge). Pour répondre, le participant appuie sur l'un des deux boutons lumineux du boîtier de réponse. L'ordre des deux premières phases (couleur ou forme) a été contrebalancé. La VD pour cette tâche est le coût de flexibilité pour les essais mixtes.



1.12 Choice reaction time

Basée sur les travaux d'Albinet et al. (2012), dans cette tâche, les participants doivent répondre le plus rapidement et le plus précisément possible aux deux stimuli présentés : si la flèche affichée pointe vers la droite (>), le participant appuie sur la touche de droite avec sa main droite, si la flèche pointe vers la gauche (<), il doit appuyer sur la touche de gauche avec sa main gauche. Les flèches sont affichées sur l'écran de l'ordinateur jusqu'à ce que la réponse soit donnée. Avant chaque essai, un point de fixation (+) est brièvement présenté. Cette tâche se compose d'une phase de démonstration, d'une phase d'entraînement et d'une phase de test comprenant 2 blocs de 44 essais. La VD pour cette tâche est le temps de réaction.



Press left key

OR



Press right key

2. Analyses complémentaires de l'Étude 1

Tableau 1 : Comparaisons deux à deux (TDIL 10-12 ans vs TV)

TACHE		
TDIL 10-12	Versus TV 10-12	Versus TV 7-9
Empan dynamique verbal	DI 10-12 < TV 10-12*	DI 10-12 < TV 7-9*
Empan dynamique spatial	DI 10-12 < TV 10-12*	DI 10-12 < TV 7-9*
2-back	DI 10-12 < TV 10-12*	DI 10-12 < TV 7-9*
WCST	DI 10-12 < TV 10-12*	DI 10-12 < TV 7-9*
CRT	DI 10-12 < TV 10-12*	DI 10-12 = TV 7-9
GNG	DI 10-12 < TV 10-12*	DI 10-12 < TV 7-9*
Reproduction -Variabilité	DI 10-12 < TV 10-12*	DI 10-12 = TV 7-9
Reproduction - Précision	DI 10-12 = TV 10-12	NC

NC : Non calculé ; *($p < .01$)

Tableau 2 : Comparaisons deux à deux (TDIL 13-16 ans vs TV)

TACHE			
TDIL 13-16	Versus TV 13-16	Versus TV 10-12	Versus TV 7-9
Empan dynamique verbal	DI 13-16 < TV 13-16*	DI 13-16 < TV 10-12*	DI 13-16 < TV 7-9*
Empan dynamique spatial	DI 13-16 < TV 13-16*	DI 13-16 < TV 10-12*	DI 13-16 < TV 7-9*
2-back	DI 13-16 < TV 13-16*	DI 13-16 < TV 10-12*	DI 13-16 < TV 7-9*
WCST	DI 13-16 < TV 13-16*	DI 13-16 < TV 10-12*	DI 13-16 = TV 7-9
CRT	DI 13-16 < TV 13-16*	DI 13-16 = TV 10-12	NC
GNG	DI 13-16 < TV 13-16*	DI 13-16 < TV 10-12*	DI 13-16 = TV 7-9
Reproduction -Variabilité	DI 13-16 < TV 13-16*	DI 13-16 < TV 10-12*	DI 13-16 = TV 7-9
Reproduction - Précision	DI 13-16 = TV 13-16	NC	NC

NC : Non calculé ; *($p < .01$)

Tableau 3 : Comparaison deux à deux (TDIL 17-20 ans vs TV)

TACHE				
TDIL 17-20	Versus TV 17-20	Versus TV 13-16	Versus TV 10-12	Versus TV 7-9
Empan dynamique verbal	DI 17-20 < TV 17-20*	DI 17-20 < TV 13-16*	DI 17-20 < TV 10-12*	DI 17-20 < TV 7-9*
Empan dynamique spatial	DI 17-20 < TV 17-20*	DI 17-20 < TV 13-16*	DI 17-20 < TV 10-12*	DI 17-20 = TV 7-9
2-back	DI 17-20 < TV 17-20*	DI 17-20 < TV 13-16*	DI 17-20 < TV 10-12*	DI 17-20 = TV 7-9
WCST	DI 17-20 < TV 17-20*	DI 17-20 < TV 13-16*	DI 17-20 < TV 10-12*	DI 17-20 = TV 7-9
CRT	DI 17-20 < TV 17-20*	DI 17-20 < TV 13-16*	DI 17-20 = TV 10-12	NC
GNG	DI 17-20 < TV 17-20*	DI 17-20 < TV 13-16*	DI 17-20 < TV 10-12*	DI 17-20 = TV 7-9
Reproduction -Variabilité	DI 17-20 < TV 17-20*	DI 17-20 < TV 13-16*	DI 17-20 < TV 10-12*	DI 17-20 = TV 7-9
Reproduction - Précision	DI 17-20 = TV 17-20	NC	NC	NC

Titre : Le rôle des fonctions cognitives dans l'estimation des durées : étude développementale et interventionnelle dans le Trouble du Développement Intellectuel Léger idiopathique

Mots clés : trouble du développement intellectuel léger, estimation temporelle, entraînement cognitif, fonctions cognitives, développement

Résumé : Bien que la recherche scientifique dans le champ du trouble du développement intellectuel (TDI) se soit développée au cours des dernières décennies, il reste un domaine encore particulièrement délaissé, et ce malgré sa forte prévalence ; le trouble du développement intellectuel léger (TDIL). Le TDIL représente 1 à 2 % de la population en France et près de 80 % des formes sont dites idiopathiques, c'est-à-dire que leur cause n'est pas connue. De rares travaux ont mis en évidence un déficit des capacités d'estimation du temps dans cette population. Celles-ci renvoient aux capacités à se repérer dans le temps ou à estimer des durées, et sont centrales pour évoluer de manière adaptée à son environnement. Parmi les ressources cognitives impliquées dans l'estimation du temps, les fonctions exécutives (FE) ou la vitesse de traitement de l'information (VTI) ont été reconnues comme particulièrement importantes. Partant de ce constat, il est possible de postuler que les difficultés d'estimation du temps dans le TDIL sont dues à un déficit des FE et/ou de la VTI. C'est dans ce contexte que nous avons cherché (1) à évaluer les capacités temporelles, exécutives et de VTI au sein de cette population spécifique d'un point de vue développemental et (2) à proposer des pistes d'accompagnement basé sur un entraînement cognitif visant l'amélioration des capacités exécutives et d'estimation des durées. Afin de répondre au premier objectif, un protocole a été proposé à 160 enfants et adolescents âgés de 10 à 20 ans : 81 enfants et adolescents au développement typique - tout-venants (TV) - et 79 enfants et adolescents porteurs de TDIL idiopathique. Cette première étude visait d'une part à évaluer des capacités cognitives et d'estimation des durées, et d'autre part à caractériser le lien entre ces différentes composantes cognitives. Les résultats de ce premier protocole mettent en évidence un retard de développement dans les performances d'estimation des durées, exécutives et de VTI chez des enfants et adolescents porteurs de TDIL par rapport à des enfants et adolescents TV, qui n'est toujours pas rattrapé à 20 ans. Les difficultés d'estimation des durées de ces enfants et adolescents porteurs de TDIL ne sont pas dues à un trouble temporel spécifique mais plutôt à un déficit des FE et à la VTI. Afin de répondre au second objectif, un protocole interventionnel a été conduit auprès d'adolescents âgés de 11 à 13 ans porteurs de TDIL idiopathique au sein d'un Institut Médicoéducatif (IME) et visait l'évaluation à la fois de la faisabilité et de l'efficacité d'un entraînement cognitif de 12 semaines (36 séances) conçu et mis en œuvre spécifiquement pour ces adolescents. Bien que portant sur un faible échantillon (5 participants dans le groupe Entraînement et 5 participants dans le groupe Contrôle), les résultats de ce second protocole suggèrent l'intérêt et la faisabilité d'un tel entraînement cognitif, que ce soit auprès des adolescents et de l'équipe pluridisciplinaire. Les résultats mettent en évidence des résultats hétérogènes d'une tâche à une autre et d'un participant à un autre, ce qui ne nous permet pas de conclure définitivement à une amélioration. L'ensemble de ce travail de thèse permet d'apporter des éléments de compréhension aux difficultés cognitives des enfants porteurs de TDIL ainsi que des pistes pour leur accompagnement.

Title: The role of cognitive functions in duration estimation: a developmental and interventional study in individuals with idiopathic Mild Intellectual Disability

Key words: mild intellectual disability, duration estimation, cognitive training, cognitive functions, development

Abstract: Although scientific research in the field of Intellectual Disability (ID) has expanded during recent decades, one area remains particularly neglected, despite its high prevalence: Mild Intellectual Disability (MID). MID is thought to affect 1 to 2% of the population in France, and nearly 80% of its forms are idiopathic, i.e. their cause is unknown. A few studies have highlighted a deficit in duration estimation in this population. Among cognitive resources involved in duration estimation, executive functions (EF) and information processing speed (PS) have been recognized as particularly important. Based on this observation, it is possible to postulate that duration estimation difficulties in MID are due to a deficit in EF and PS. Therefore, we sought (1) to assess duration estimation, EF and PS of this specific population from a developmental point of view, and (2) to suggest ways of providing support based on cognitive training aimed at improving EF, PS and duration estimation capacities. To reach the first objective, a protocol was proposed to 160 children and adolescents aged 10 to 20 years: 81 typically developing children and adolescents (TD) and 79 children and adolescents with MID. The aim of the first study was to assess cognitive and duration estimation abilities, to characterize the relationship between these different cognitive components. The results of this first protocol highlighted a developmental delay in duration estimation, EF and PS performance in children and adolescents with MID compared with TD children and adolescents. The observed delay had still not been overcome by the age of 20. The difficulties in estimating durations in children and adolescents with MID are not due to a specific duration estimation disorder, but rather to difficulties in EF and PS. To address the second objective, an interventional protocol was conducted with adolescents aged from 11 to 13 with MID, to assess both the feasibility and effectiveness of a 12-week cognitive training program (36 sessions) designed and implemented specifically for these adolescents. Although based on a small sample (5 participants in the Training group and 5 participants in the Control group), the results of this second protocol suggest the interest and feasibility of this type of training, both for adolescents and for healthcare professionals. The results show heterogeneous results from one task to another and from one participant to another, which does not allow us to reach the definitive conclusion that there has been an improvement. Taken as a whole, this work provides elements for a better understanding of the cognitive difficulties of children with MID, as well as support opportunities.