

Université de Montréal

Caractérisation des prodiges musicaux

Par

Chanel Marion-St-Onge

Département de psychologie
Faculté des arts et des sciences

Thèse présentée à la Faculté des études supérieures et postdoctorales en vue de l'obtention du
grade de Philosophiae Doctor (PhD)
en psychologie – recherche et intervention
option neuropsychologie clinique

12 février 2023

© Chanel Marion-St-Onge, 2022

Université de Montréal

Unité académique : département de psychologie, faculté des arts et des sciences

Cette thèse intitulée

Caractérisation des prodiges musicaux

Présentée par

Chanel Marion-St-Onge

A été évaluée par un jury composé des personnes suivantes

Sarah Lippé

Présidente-rapporteure

Isabelle Peretz

Directrice de recherche

Jean-François Rivest

Membre du jury

Mathieu Pilon

Examineur externe

Résumé

Les prodiges musicaux sont des musiciens qui ont atteint un niveau de performance exceptionnel, et ce avant l'adolescence. Les premières études à leur sujet ont été écrites il y a plus de 100 ans. Malgré tout, les données psychologiques sur les prodiges musicaux sont rares. Une des théories influentes concernant l'acquisition de l'expertise est celle de la pratique délibérée, selon laquelle le développement du talent se fait essentiellement avec la pratique. La précocité du talent des prodiges paraît défier cette notion et suggère la présence de prédispositions biologiques. D'autres modèles théoriques proposent une vision davantage multifactorielle du développement de l'expertise.

La présente thèse vise à révéler les caractéristiques psychologiques des prodiges en utilisant une méthodologie empirique. L'objectif général est de déterminer en quoi ces musiciens exceptionnels se démarquent des autres.

En premier lieu, une étude transversale avait comme objectif de déterminer si la pratique, l'intelligence et la personnalité font des prodiges des musiciens à part. Pour ce faire, nous avons recruté 19 prodiges musicaux et les avons comparés à 35 musiciens qui ont soit débuté leur pratique musicale tôt (vers 6 ans) ou plus tard (vers 10 ans), mais qui ont une quantité similaire d'année d'expérience musicale au moment de l'évaluation, ainsi qu'à 16 non-musiciens. Les participants ont tous complété une échelle d'intelligence de Wechsler, l'inventaire de personnalité du Big Five, le quotient du spectre de l'autisme, le *Barcelona Music Reward Questionnaire*, le *Dispositional Flow Scale*, et un historique détaillé de leur pratique musicale. Nos résultats indiquent qu'aucun des traits psychologiques ne distingue les prodiges des autres, hormis la propension à être dans un état de flow lors de la pratique musicale. D'autres aspects différenciant les prodiges étaient

l'intensité de leur pratique avant l'adolescence, ainsi que la source de leur motivation lorsqu'ils ont commencé à jouer de leur instrument.

En second lieu, nous avons étudié un virtuose de la guitare atteint du syndrome de Gilles de la Tourette, qui apprend très rapidement de nouvelles pièces. Pour ce faire, nous avons comparé sa vitesse d'apprentissage d'une nouvelle pièce à 3 autres guitaristes expérimentés et nous l'avons également comparé à un échantillon contrôle de musiciens (N = 15) sur une variété de tâches; apprentissage musical et verbal, perception musicale, mémoire de travail, QI et propension au flow. La structure et le fonctionnement de son cerveau ont également été analysés à l'aide de l'imagerie par résonance magnétique. Les résultats indiquent que le prodige peut apprendre davantage de notes que ses pairs en un temps donné, tout en étant plus musical. Celui-ci était également un des meilleurs pour percevoir et apprendre de nouvelles mélodies. Son QI était comparable à ses pairs, mais sa mémoire de travail auditivo-verbale et visuo-spatiale était supérieure à celle de ses pairs et de la population générale.

Mis ensemble, nos résultats indiquent que les prodiges musicaux sont caractérisés par une diversité de trajectoires développementales, et que la pratique seule ne fait pas le prodige. Nos résultats sont compatibles avec les modèles multifactoriels de l'expertise. Plusieurs facteurs sont à l'œuvre ; la pratique intensive précoce, le flow, la motivation, et parfois la présence de conditions neurodéveloppementales et d'habiletés musicales et mnésiques supérieures. Les données suggèrent aussi que la douance musicale est un phénomène distinct de la douance intellectuelle.

Mots-clés : prodiges, prodiges musicaux, douance, talent, expertise, intelligence, mémoire de travail, autisme, pratique délibérée

Abstract

Musical prodigies attained an exceptionally high level of performance before adolescence. The first studies on musical prodigies were published more than a hundred years ago. Nevertheless, empirical data on musical prodigies is scarce.

An influent theory of expertise development is the deliberate practice view, which stipulates that talent is essentially developed through deliberate practice. Prodigies' talent precocity apparently defies this assumption and suggests biological predispositions. Other theoretical models offer instead a multifactorial viewpoint of expertise development.

This thesis aims to reveal musical prodigies' psychological characteristics using empirical methods. The general goal is to determine on which levels do these extraordinary musicians stand out from their peers.

First, a cross-sectional study aimed to determine if practice, intelligence and personality make prodigies stand out from their musician peers. To do so, we recruited 19 musical prodigies and compared them to 35 musicians who began their musical practice early on (around 6 years old) or later (around 10 years old), but who accumulated similar amounts of years of practice at the moment of testing, as well as 16 nonmusicians. Participants were administered a Wechsler intelligence scale, the Big Five personality inventory, the autism spectrum quotient, the Barcelona Music Reward Questionnaire, the Dispositional Flow Scale and the history of their lifetime practice. Results indicate that no psychological traits distinguish prodigies, except propensity to experience flow during music practice. The other aspects differentiating prodigies were intense and precocious practice as well as the source of their motivation when they began to play.

Second, we studied a guitar virtuoso with a Tourette syndrome who can allegedly learn new pieces very fast. To do so, we compared his learning speed of a new guitar piece to that of 3 other experienced guitarists. We also compared him to a sample of 15 control musicians on a variety of tasks; musical and verbal learning, musical perception, working memory, IQ and propension to experience flow. Brain structure and function was also analysed through magnetic resonance imaging. Results indicate that the prodigy can learn more notes than his peers in a given time, whilst being more musical. He was also better to perceive and learn new melodies. His IQ was comparable to his peers, but his working auditory and visual-spatial working memory were superior to his peers as well as the general population.

Together, our results suggest that musical prodigies are characterized by a diversity of developmental trajectory. They also suggest that practice alone does not make a prodigy. Our results support multifactorial models of expertise. Multiple factors are at play ; intensive and precocious practice, flow, motivation, and sometimes neurodevelopmental conditions or particular musical or memory abilities. Data also suggest that musical giftedness and intellectual giftedness are two separate phenomena.

Keywords : prodigies, musical prodigies, giftedness, talent, expertise, intelligence, working memory, autism, deliberate practice

Table des matières

Résumé	5
Abstract	7
Table des matières	9
Liste des tableaux	11
Liste des figures	13
Remerciements	18
Avant-propos	18
Chapitre I – Introduction	25
1.1 Concepts de base	25
1.2 Revue de la littérature au sujet des prodiges musicaux.....	28
1.3 Les modèles théoriques	39
1.3.1 Théorie de la pratique délibérée	39
1.3.2 Au-delà des effets de la pratique – critique de la pratique délibérée	40
1.3.3 Modèle multifactoriel de l’interaction gène-environnement (MGIM).....	42
1.4 Objectifs de recherche	49
Chapitre II – Méthodologie et résultats	51
Article 1 : What Makes Musical Prodiges?.....	53
Article 2 : Exceptional memory in a guitar virtuoso: A single case-control study	97
Chapitre III – Discussion générale	147
Rappel des objectifs	149
Quels sont les ingrédients pour devenir un prodige musical ?.....	151
Les prodiges sont-ils doués ?	153
Les prodiges : un paradigme imparfait.....	156
Attention aux prodiges	158
Limites et pistes futures.....	159
Conclusion.....	161
Bibliographie	163

Liste des tableaux

Chapitre I : Introduction

Tableau 1. Études empiriques modernes sur les prodiges musicaux.	32
---	----

Chapitre II : Méthodologie et résultats

Article 1 : What makes musical prodigies?

Table 1. Demographics.	81
Table 2. Musical experience.	82
Table 3. Selected items to measure motivation	83

Article 2: Exceptional memory in a guitar virtuoso: A single case-control study

Table 1. <i>Demographics and musical experience of TB and the musician controls</i>	111
Table 2. <i>Detailed musical experience of TB and the guitarist controls</i>	111
Table 3. <i>Guitar learning task results</i>	113
Table 4. <i>Strategies used by the participants and their frequency of use during the guitar learning task</i>	116

Liste des figures

Chapitre I : Introduction

Figure 1. Illustration de la terminologie utilisée	27
Figure 2. Version adaptée du Modèle d'interaction multifactorielle gène-environnement (MGIM), proposé par Ullén et al. (2016). Les éléments évalués dans la présente thèse sont indiqués en noir.	44

Chapitre II : Méthodologie et résultats

Article 1 : What makes musical prodigies?

Figure 1. Adaptation from the Multifactorial Gene–Environment Interaction Model.....	84
Figure 2. Musical experience measures	85
Figure 3. Mean yearly amount and standard error of deliberate practice as a function of age	86
Figure 4. Deliberate practice accumulated between 6 and 14 years old	87
Figure 5. Mean yearly amount of practice and standard error as a function of year since onset of musical experience.....	88
Figure 6. Source of motivation when beginning to play	89
Figure 7. Global flow	90
Figure 8. Autism Spectrum Quotient (AQ)	91
Figure 9. Big Five Inventory	92
Figure 10. Global IQ	93
Figure 11. Mean IQ scores	94
Figure 12. Deliberate practice accumulated between 6 and 14 years old in relation to extraversion	95

Article 2: Exceptional memory in a guitar virtuoso: A single case-control study

Figure 1. TB's musical experience by age	109
Figure 2. Detailed quality of performance scores for TB and guitarists	115
Figure 3. Results to the California Verbal Learning Test (CVLT-II)	118
Figure 4. Total correct responses on a total of 52, at the Musical Ear Test (MET).....	120

Figure 5. Working memory performance scores, by modality..... 122

Figure 6. Cortical thickness estimates (average of left and right hemispheres) in mm for the mean of the whole cortex and regions of interest..... 126

Figure 7. Estimated total intracranial volume 127

Figure 8. Intrinsic connectivity contrast and Seed-based analyses 128

Liste des sigles et des abréviations

ADHD	<i>Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder</i>
AMEB	Conseil d'Examens de Musique d'Australie
ANOVA	Analyse de variance / <i>Analysis of variance</i>
AQ	<i>Autism Spectrum Quotient</i>
ASD	<i>Autism Spectrum Disorder</i>
BMRQ	<i>Barcelona Music Reward Questionnaire</i>
CI	<i>Confidence interval</i> / Intervalle de confiance
CVLT-II	<i>California Verbal Learning Test Second Edition</i>
HSAM	<i>Highly Superior Autobiographical Memory</i>
IQ	<i>Intellectual quotient</i>
IRM	Imagerie par résonance magnétique
M	Moyenne / <i>Mean</i>
MET	<i>Musical Ear Test</i>
MGIM	<i>Multifactorial Gene-Environment Interaction Model</i>
MRI	<i>Magnetic resonance imaging</i>
N / n	Nombre de participants / <i>Number of participants</i>
QI	Quotient intellectuel
RCM	<i>Royal Conservatory Piano Syllabus</i>
ROI	<i>Region of interest</i>
SD	<i>Standard deviation</i>
SGT	Syndrome de Gilles de la Tourette
TSA	Trouble dans le spectre de l'autisme
WAIS-IV	<i>Wechsler Adult Intelligence Scale Fourth Edition</i>
WASI	<i>Wechsler Abbreviated Scale of Intelligence</i>
WMS-III	<i>Wechsler Memory Scale Third Edition</i>

À ma mère, Christine Marion

Remerciements

Je tiens à remercier d'abord Isabelle Peretz, ma directrice de recherche. Merci Isabelle pour ta confiance, ta grande disponibilité, ta rigueur et ton soutien continu. Ta passion pour la recherche se est contagieuse et est une grande source d'inspiration. J'ai énormément d'admiration pour la professeure, la mentore et la personne généreuse et intelligente que tu es. Je me sens fière et choyée d'avoir pu faire mon doctorat sous ta direction. Cette thèse n'aurait pas été possible sans ton engagement, ton support et ton expertise. Ce fut un réel plaisir de travailler avec toi et de te côtoyer dans les dernières années. C'était une très belle aventure. Merci mille fois.

La recherche contenue dans cette thèse n'aurait pas été possible sans le support de plusieurs collègues. Merci à Michael W. Weiss pour ton soutien précieux et ton aide pour les analyses statistiques, pour ton soutien avec le codage, et pour la révision des textes. Megha Sharda, merci pour ton mentorat, ta rigueur, et pour ton aide concernant la conception du projet, le recrutement, le testing et les analyses. Merci à Dawn Merrett pour l'analyse des données d'imagerie et son soutien pour la rédaction. Merci aux assistants de recherche qui ont apporté une aide essentielle au bon déroulement et à l'aboutissement du projet. Ma chère Margot Charignon, merci pour ta joie, ton travail, ta disponibilité et ton engagement. Merci également à Lucie-Maud Ménard, Renaud Ross-DeBlois, Kathya Carrier, Lydia Trudel, Marianne Beaulieu, Charline Lavigne, Alejandro Hernandez. Merci à Mihaela pour ta douceur et soutien à différents niveaux. Merci à Marie-Élaine Lagrois de m'avoir accompagnée et guidée lors de mon premier été au Brams. Véronique Martel, merci pour ton support et ta présence rassurante dans les dernières années.

Je tiens aussi à remercier les personnes qui m'ont accompagnées plus personnellement dans ce parcours doctoral. Je remercie tout particulièrement les membres du Groupe d'Intérêt en Neuropsychologie (GIN). Votre curiosité, votre humour, votre vivacité et votre agréabilité sont une grande source de joie et de camaraderie. Merci spécialement à Patricia Laniel, Olivier Girard-Joyal, Antoine Slegers et Marie-Maxim Lavallée, pour votre amitié précieuse et votre soutien existentiel. Merci également à mes superviseuses d'internats cliniques, Amélie Morin et Annie-Claude Perrault qui ont été compréhensives et soutenantes dans cette dernière année d'internats et de rédaction.

Un immense merci à ma mère, ma sœur, ma belle-famille, pour votre soutien dans les dernières années. Maman, merci pour ta disponibilité, ton support moral, ta bienveillance, et ton temps auprès de ta petite-fille, ce qui m'a d'ailleurs permis de rédiger cette thèse, que je te dédie.

Merci Cassandra, mon rayon de soleil née en pleine année de rédaction pandémique. Tu donne un sens à tout ce parcours.

Enfin, merci à Marc-André d'avoir partagé les 10 dernières années avec moi. Ton soutien et ton amour m'ont permis de passer à travers les hauts et les bas de cette aventure universitaire. À un prochain chapitre de vie ensemble !

Avant-propos

Sarah Chang est une violoniste prodige incontestable. Née en 1980, elle a été acceptée à l'école de musique de réputation internationale Juilliard à l'âge de 6 ans. À 9 ans, elle a joué en tant que soliste avec le réputé orchestre de Philadelphie ainsi que l'orchestre philharmonique de New York. Peu après, à 10 ans, elle a enregistré son premier album musical, « Debut ». À seulement 13 ans, elle a été nommée « Jeune artiste de l'année » par le magazine « Gramophone ». Le lecteur intéressé peut facilement dénicher des vidéos de ses performances époustouflantes sur internet.

Quel est le secret derrière ce talent exceptionnel et précoce? Qu'ont ces prodiges de spécial? Malgré un intérêt populaire (des prodiges attirent des millions de visionnements sur YouTube) et scientifique (voir le volumineux ouvrage *Musical Prodiges* édité par McPherson, 2016) pour le phénomène, bien peu de littérature scientifique empirique existe sur le sujet. La littérature existante sera résumée un peu plus loin. L'étude des prodiges musicaux constitue un paradigme intéressant puisqu'ils nous permettent d'étudier les dispositions naturelles qui permettent de développer le talent dans un domaine. En effet, leur jeune âge au moment de leurs accomplissements exceptionnels magnifie le rôle des prédispositions dans le développement du talent.

L'étude des prodiges musicaux nous permet d'étudier le talent musical à son extrême en évitant un effet plafond tel que l'on risquerait de rencontrer en utilisant des tests d'habiletés musicales habituels. De plus, l'étude des prodiges permet de s'intéresser directement au talent musical et non à une caractéristique associée comme le nombre d'années d'étude formelle de la musique. Les prodiges ont par définition les aptitudes naturelles nécessaires au développement du talent musical. Étant donné que leur identification repose sur leurs accomplissements réels, il s'agit

en quelque sorte du « fait accompli » : toutes les variables nécessaires au développement d'un talent musical précocement exceptionnel ont été présentes au moment où il le fallait.

Les prodiges musicaux fascinent depuis longtemps par la nature exceptionnelle de leur talent. En effet, dans les années 1920, des prodiges musicaux se donnaient en spectacle. Par exemple, Buddy Rich jouait dans le vaudeville de ses parents à l'âge de 3 ans. À 4 ans, il était le 2^e enfant le mieux payé au monde (Tormé, 1991; cité dans Janzen, Ammirante, & Thompson, 2016). À l'heure actuelle, les performances de nombreux prodiges musicaux peuvent être visionnées en ligne et attirent des millions d'internautes. S'ils fascinent autant, c'est qu'ils se démarquent nettement de la population normale. C'est-à-dire qu'ils accomplissent des choses tout à fait étonnantes pour leur âge, de manière comparable à la performance de musiciens adultes qui ont accumulé des milliers d'heures de pratique.

La présente thèse s'intéresse à révéler les prédispositions qui contribuent au talent précocement exceptionnel des prodiges en utilisant une méthodologie empirique. Les prodiges musicaux sont une population d'intérêt pour la recherche scientifique car ils sont à l'extrême du continuum du talent musical. L'étude des populations extrêmes peut nous renseigner sur la moyenne. Des recherches en génétique comportementale indiquent d'ailleurs que les extrêmes d'un trait sont souvent la prolongation du continuum (Plomin, Shakeshaft, Mcmillan, & Trzaskowski, 2014). À l'opposé, des liens entre le phénomène des prodiges musicaux et l'autisme ont été proposés et certaines données scientifiques vont dans le sens d'une telle association. Ainsi, les prodiges sont-ils une catégorie à part qui se distingue qualitativement des autres musiciens, ou sont-ils simplement à l'extrême du continuum?

Dans un premier temps, nous avons caractérisé les prodiges musicaux en comparant différentes mesures psychologiques (fonctionnement intellectuel, personnalité, pratique musicale,

motivation, flow, oreille absolue) d'un groupe de prodiges à des groupes de musiciens expérimentés et de non-musiciens. Enfin, je présenterai le cas d'un musicien virtuose atteint d'un Syndrome de Gilles de la Tourette, ayant rapporté avoir des capacités d'apprentissage exceptionnelles avec son instrument.

Trois chapitres constituent cette thèse. Le premier chapitre introduit le concept de prodige musical, en les situant dans la littérature scientifique. D'abord, j'y définis plusieurs concepts de base liés au développement du talent. Ensuite, j'y présente une revue de la littérature au sujet des prodiges musicaux. Pour tenter d'élucider la question de l'étiologie des prodiges musicaux, je présenterai différentes conceptions théoriques pertinentes. Le premier chapitre se termine par l'exposition des objectifs de la présente thèse. Le deuxième chapitre se compose des deux articles scientifiques effectués dans le cadre de cette thèse de doctorat. Enfin, le troisième chapitre discute des travaux de recherche effectués et de leur apport, et aborde certaines pistes de recherches futures.

Chapitre I – Introduction

1.1 Concepts de base

Plusieurs termes souvent utilisés dans le domaine du talent et de l'expertise peuvent avoir différentes significations. Par souci de clarté, nous détaillons ici ces différents concepts, tels qu'ils sont définis dans le cadre des travaux de recherche de la présente thèse.

Aptitude: Capacité naturelle ou innée dans un domaine particulier. Se rapproche du concept de potentiel ou de prédisposition.

Expertise : performance exceptionnelle dans un domaine particulier (Plomin, Shakeshaft, McMillan, & Trzaskowski, 2014).

Habilité : Terme parapluie qui réfère à des capacités, qu'elles soient innées (aptitude, prédisposition) ou acquises (compétence, talent, expertise).

Talent: Un certain flou conceptuel entoure la notion de talent. Nous utiliserons ici le mot talent dans le sens d'un niveau de maîtrise exceptionnel de compétences systématiquement développées (Gagné & McPherson, 2016).

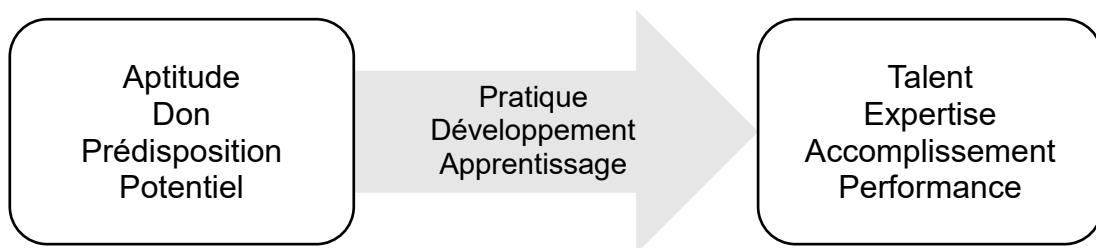


Figure 1. Illustration de la terminologie utilisée

1.2 Revue de la littérature au sujet des prodiges musicaux

Sarah Chang, mentionnée plus tôt, est née aux États-Unis en 1980, de parent Coréens. Elle a commencé ses études en violon à 4 ans. Au cours de cette première année, elle aura joué avec plusieurs orchestres. Elle a enregistré son premier album à 10 ans. Son milieu familial n'est pas anodin : sa mère est compositrice et son père est violoniste et professeur de musique. Elle a déclaré aux médias qu'elle était reconnaissante de savoir déjà ce qu'elle voulait faire dans la vie. Les prodiges ont parfois des talents plus spécifiques, telles qu'une très grande mémoire musicale ou des habiletés exceptionnelles en composition ou en improvisation. Par exemple, un des plus célèbres prodiges est l'Autrichien Wolfgang Amadeus Mozart. Celui-ci a commencé à jouer de la musique à 3 ans, et composait ses premières œuvres à 6 ans. Il aurait assisté, à l'âge de 14 ans, au Miserere de Gregorio Allegri, une pièce religieuse dont les partitions n'étaient pas publiées, et il serait parvenu à le retranscrire à l'aide de sa seule mémoire (Deutsch, 1966). Un autre prodige célèbre, cette fois plus près de nous, est André Mathieu, le « jeune Mozart Canadien ». Celui-ci s'est produit en récital au Ritz Carleton Hotel à 6 ans, et au Carnegie Hall de New York à 13 ans, où il a joué une de ses propres compositions (Trottier, 2016).

Comment expliquer que certains enfants développent un talent musical aussi exceptionnel, et ce, à une vitesse bien supérieure à la moyenne ? Car ce ne sont évidemment pas tous les enfants de musiciens qui deviennent des prodiges. Sont-ils tout simplement à l'extrême d'un continuum, c'est-à-dire qu'ils possèdent, à un degré supérieur à la moyenne, les mêmes « ingrédients » qui favorisent le développement du talent musical ? Ou sont-ils des cas à part, avec des caractéristiques uniques, voire idiosyncratiques, qui les distinguent du reste de la population ?

Tel qu'entendu dans la présente thèse, un prodige musical est un musicien ayant atteint un niveau de performance exceptionnel avant l'adolescence. Le terme « prodige » est connoté puisqu'il réfère également à un phénomène merveilleux, magique ou surnaturel.

Il y a des avantages et des inconvénients à utiliser cette expression. D'abord, il peut être tout de même intéressant de l'utiliser malgré sa connotation particulière, puisque l'on tente ici d'élucider un phénomène considéré « surnaturel » à l'aide de la méthode scientifique. Tel n'est-il pas l'objectif de la science que de percer des mystères de la vie ? Ainsi, en autant que le phénomène est bien défini de manière opérationnelle, il est tout à fait légitime d'utiliser l'expression « prodige musical ». D'un autre côté, comme le terme est « chargé », il a le potentiel d'être dommageable pour les individus qualifiés ainsi ou non. Par exemple, ceux qui correspondent à cette appellation pourraient vivre une certaine pression de performance, et une reconnaissance qui s'appuie surtout sur leur jeune âge et qui peut donc rendre plus difficile le passage de ces artistes à l'adolescence puis à l'âge adulte. Également, il serait dommage que la reconnaissance de certains en tant que « prodige » en décourage d'autres à persévérer.

Cette expression peut aussi créer une barrière de scepticisme chez le lecteur, car chacun peut avoir sa propre définition bien ancrée de la signification du terme. Ceci est tout particulièrement le cas chez les musiciens. Si l'un considère que le phénomène étudié ici n'est pas de « vrais prodiges », les conclusions peuvent être écartées d'un revers de la main. Comme notre objectif est de partager les découvertes effectuées dans le cadre de cette thèse, nous voudrions éviter un état de fermeture chez le lecteur. Ainsi, des synonymes à la définition de « prodige musical » utilisée ici peuvent être utilisés, notamment : « jeunes doués en musique », ou ayant un « talent précocement exceptionnel ». Ces expressions seront utilisées de manière interchangeable dans le présent document.

Dans la littérature, ce qui se dégage des différentes définitions de « prodige musical » est que ce sont des musiciens qui ont atteint un niveau de performance exceptionnel, et ce avant l'adolescence. Il existe ensuite certaines variations dans la définition opérationnelle des prodiges, comme le niveau de performance (ex. comparable à un adulte ; Feldman, 1993) ainsi que l'âge maximal auquel il faut atteindre ce niveau varient. Par exemple, certains auteurs fixent le seuil d'âge maximal à 10 ans (Feldman, 1993 ; Ruthsatz & Detterman, 2003), 12 ans (Solomon, 2012), et d'autres ne précisent pas l'âge exact (Ruthsatz, Petrill, Li, Wolock, & Bartlett, 2015; G. McPherson & Hallam, 2009). Ce choix concernant un âge en particulier, notamment dans le cas de l'article de Feldman (1993) n'est pas toujours clairement justifié et peut revêtir un caractère arbitraire (Pausch, Düvel, & Kopiez, 2022). L'analyse de données historiques provenant de 213 rapports de prodiges musicaux datant de la première moitié du 19^e siècle a toutefois pu montrer que l'âge moyen pour la première performance publique d'un prodige est de 10.7 ans (Kopiez, 2011). De telles données empiriques plus récentes n'existent pas à notre connaissance et nous tenterons d'y remédier. Gagné et McPherson dégagent de ces différentes définitions deux paramètres essentiels : le haut niveau d'accomplissement et la précocité (Gagné & McPherson, 2016). Ils suggèrent ainsi que c'est en fait la rapidité d'apprentissage qui soit le facteur déterminant des prodiges. Et en effet, les prodiges tendent à progresser plus rapidement que leurs pairs à travers le curriculum (Comeau, Vuvan, Picard-Deland, & Peretz, 2017; Janzen et al., 2016).

Une des difficultés liées à l'évaluation du niveau de compétence nécessaire pour atteindre le statut de prodige musical est qu'il n'existe pas de mesure continue et objective de la performance musicale. Au jeu d'échecs, par exemple, il existe des systèmes de cotation (ex. le « Elo rating ») qui quantifie le statut ou la force de chacun des joueurs en fonction des parties enregistrées qui ont été jouées. Une manière d'identifier de manière opérationnelle les prodiges musicaux utilisée par

d'autres chercheurs est la reconnaissance de leur talent à travers une renommée nationale ou internationale, par exemple par leur apparition dans les médias, ou la réception de prix spéciaux (Ruthsatz et al., 2015).

Pour vérifier si le critère utilisé pour qualifier les prodiges musicaux est valide, Comeau et al. (2017) ont fait écouter à des musiciens et des non-musiciens (N total =51) des extraits audios de performances de prodiges et de professionnels pris sur internet. Les participants ont performé au-dessus du hasard pour distinguer les prodiges des professionnels, mais de manière modeste, et les musiciens (62.6% de réponses correctes) étaient meilleurs que les non-musiciens (52.8% de réponses correctes) pour identifier les prodiges. Les résultats montrent aussi que les prodiges plus âgés (11 à 14 ans) étaient plus difficiles à différencier des professionnels que les prodiges plus jeunes. Une partie de ces résultats ont été répliqués plus récemment auprès d'un plus grand échantillon de juges (N = 278; Pausch, Düvel, & Kopiez, 2022). Dans cette étude, les participants qui jugeaient les extraits étaient également capables de distinguer les prodiges des musiciens professionnels, avec une performance légèrement au-dessus du hasard (53.7% de réponses correctes). Toutefois, les musiciens n'étaient pas meilleurs que les non-musiciens pour faire la différence entre les prodiges et les musiciens professionnels. En résumé, il est possible de distinguer les performances de prodiges de celles de musiciens professionnels, mais il s'agit d'une tâche ardue. Une définition de prodige impliquant un niveau de performance similaire à celui d'un musicien professionnel n'est donc pas soutenue par les données empiriques.

En 2016, un ouvrage de référence, « Musical prodigies » a été publié sous la direction de Gary E. McPherson. Cet ouvrage témoigne d'un intérêt vif et actuel envers les prodiges musicaux. Toutefois, cet ouvrage de près de 800 pages inclut très peu de contenu expérimental et empirique. Le livre se divise en trois sections. La première contient 7 chapitres qui concernent des cadres

théoriques basés sur la littérature scientifique, musicologique, ou historique existante. Certains de ces cadres théoriques seront abordés dans la présente thèse. La deuxième section aborde différents aspects du développement des prodiges, et comporte 2 études de cas avec des données originales. Les 12 autres chapitres de cette section consistent par exemple en des revues de la littérature sur différents aspects pouvant être reliés au phénomène des prodiges (ex. motivation, choix de carrière, psychologie du sport), des vignettes cliniques ou historiques. La troisième section concerne des exemples individuels de prodiges musicaux du passé, et les 13 chapitres de la section ont un contenu historique ou biographique. Comme Gary McPherson le souligne, cet ouvrage interroge les différents facteurs qui semblent influencer le phénomène des prodiges musicaux, et il espère que ce livre stimulera la discussion sur ce sujet « largement inexploré » (McPherson, 2016, p. xxvii). Bien que les premières études sur les prodiges ont vu le jour il y a une centaine d'années (p.ex. Stedman, 1923 ; Révész, 1925 ; Baumgarten, 1930), celles-ci sont peu nombreuses, et la plupart sont des études de cas (Feldman & Morelock, 2020). Les principales études modernes sur les prodiges musicaux sont listées dans le tableau I.

Tableau 1.

Études empiriques modernes sur les prodiges musicaux.

	Auteurs	Participant(s)	MdT (percentiles)	QI (percentiles)
Études de cas				
	(Ruthsatz & Detterman, 2003)	1 prodige musical (Derek)	>99.9	98
	(Dalla Bella, Sowi, Farrugia, & Berkowska, 2016)	1 prodige musical (Igor)	-	-
	(Janzen et al., 2016)	1 prodige musical	-	-
	(Comeau, Lu, Swirp, & Mielke, 2018)	1 prodige musical (LN)	97*	-
Études de groupes				
	(Feldman & Goldsmith, 1986)	6 prodiges dont 2 en composition musicale	-	-

(Ruthsatz & Urbach, 2012)	8 prodiges dont 6 en musique	99.9	99.6
		>99.9	-
		99.7	97
		99.9	99.7
		>99.9	92
		>99.9	70
(Ruthsatz, Ruthsatz-Stephens, & Ruthsatz, 2014)	18 prodiges, 7 prodiges musicaux précédents + un nouveau	99.9	97
(Ruthsatz et al., 2015)	11 familles de prodiges	-	-
(Comeau et al., 2017)	Extraits vidéo de prodiges	-	-
(Pausch et al., 2022)	Extraits vidéo de prodiges	-	-

* Les scores de type QI ont été transformés en percentiles pour une meilleure clarté. Le score avec un * est en percentiles dans l'article original. L'abréviation *MdT* signifie mémoire de travail et *QI* signifie quotient intellectuel.

En effet, dans les 50 dernières années, 4 études de cas ont investigué en détails les habiletés de prodiges à l'aide de tâches musicales et/ou de tâches cognitives standardisées. Dans l'étude de cas la plus récente (Comeau et al., 2018), le jeune pianiste prodige de 11 ans (LN) a pu apprendre de courts extraits jusqu'à deux fois plus rapidement que trois pianistes universitaires. LN montrait une capacité élevée à discriminer des mélodies, mais des habiletés de synchronisation rythmique dans la moyenne et une lecture à vue sous la moyenne des trois pianistes universitaires (Comeau et al., 2018).

Dans une autre étude de cas, Igor, un prodige à la batterie, a été étudié alors qu'il avait entre 5 et 7 ans (Dalla Bella et al., 2016). Son niveau de performance a été estimé par 6 experts ayant évalué à l'aveugle des extraits audio d'Igor et de 10 batteurs experts. Ils ont déterminé que Igor avait le niveau d'un batteur adulte ayant reçu 5 ans de cours formels. Igor, âgé entre 5 et 7 ans au cours de l'étude, a une meilleure synchronisation rythmique que 11 jeunes non-musiciens de son âge et que 41 adultes universitaires non-musiciens, mais une perception rythmique qui ne diffère pas des adultes. Igor était aussi meilleur que les contrôles pour apprendre un nouveau rythme, mais seulement lorsque celui-ci avait une structure temporelle régulière (isochrone).

Dans une troisième étude de cas (Ruthsatz & Detterman, 2003), un prodige musical de 6 ans nommé Derek a été soumis à une batterie mesurant les habiletés intellectuelles ainsi qu'un test d'aptitude tonale et rythmique, le *Intermediate Measures of Music Audiation* (Gordon, 1986). Derek performait mieux dans les deux sous-sections du test d'habiletés musicales, avec une performance de 95% au sous-test sur la tonalité et 98% au sous-test sur le rythme. Les auteurs rapportent qu'à ce test, 80% équivaut à un niveau « hautement doué » (Ruthsatz & Detterman, 2003).

Dans une quatrième étude de cas, des chercheurs ont aussi étudié les habiletés de synchronisation, mais cette fois-ci d'un prodige contrebassiste de 12 ans (Janzen et al., 2016). Ce jeune a commencé ses leçons de piano à 4 ans et la contrebasse à 8 ans. Le critère de sélection pour ce prodige était l'âge auquel il avait atteint son plus haut niveau selon le Conseil d'Examens de Musique d'Australie (AMEB), une organisation australienne ayant instauré un système de qualifications et d'évaluations musicales depuis 1887. En effet, dès ses 12 ans, il avait atteint le niveau de contrebasse 6, habituellement réservé aux 17-18 ans selon l'AMEB. À 12 ans, on a mesuré ses habiletés de production rythmique, en comparaison à deux groupes de jeunes de 12 ans; des musiciens ayant accumulé la moitié de ses heures de pratique et des non-musiciens. Dans une tâche de synchronisation rythmique, le prodige ne performait pas mieux que 11 musiciens du même âge, et ce même s'ils avaient moins d'années d'entraînement musical que le prodige (Janzen et al., 2016). Ces résultats suggèrent que d'autres éléments seraient à l'origine des habiletés du prodige que la pulsation métronomique. Les auteurs proposent qu'il se distingue par un ensemble complexe d'habiletés lui permettant de s'exprimer à travers la musique, mais sans élaborer davantage.

Ce qui ressort de ces études de cas est que les prodiges diffèrent les uns des autres dans leur profil d'habiletés musicales. Il appert que les prodiges n'ont pas des aptitudes musicales de base

exceptionnelles en tous points, malgré que par définition, ils se démarquent nettement des autres en termes de performance musicale.

Il existe quelques études qui ont été faites sur plusieurs prodiges à la fois (voir tableau 1). Seulement les études de groupe menées par Joanne Ruthsatz incluent des données sur le fonctionnement intellectuel. Les autres études sont soit descriptives/qualitatives (Feldman & Goldsmith, 1986), ou utilisent des enregistrements de prodiges plutôt que les prodiges eux-mêmes (Comeau et al., 2017; Pausch et al., 2022). En 2012, Ruthsatz & Urbach décrivent brièvement l'histoire de 8 prodiges et détaillent également leur fonctionnement intellectuel mesuré à l'aide du Stanford-Binet. Puis, en 2014, Ruthsatz agrandit son échantillon et greffe aux 8 prodiges précédent Derek (Ruthsatz & Detterman, 2003) ainsi que 9 nouveaux prodiges (Ruthsatz et al., 2014). Il s'agit du plus grand échantillon de prodiges jamais rassemblé, soit au total 18 prodiges, dont 8 prodiges musicaux, 5 prodiges en mathématiques et 5 prodiges en arts visuels, âgés entre 6 et 32 ans (moyenne de 13 ans). L'objectif était de déterminer si les profils cognitifs des prodiges différaient selon le domaine d'expertise. Le Stanford-Binet (5e édition) leur a été administré. Des différences de fonctionnement cognitif sont effectivement associées aux domaines d'expertise. Le quotient intellectuel global moyen des prodiges était au 96^e percentile, allant du 50^e au 99.9^e percentile. Les prodiges en mathématiques ont obtenu en moyenne un QI au 99.6^e rang centile (99^e au 99.9^e percentile), des scores significativement plus élevés que ceux des prodiges en arts visuels ayant obtenu en moyenne un QI au 70^e percentile (50^e au 86^e percentile). Les prodiges en musique ont obtenu en moyenne un QI au 97^e percentile (70^e au 99.7^e percentile), mais ne différaient pas significativement des autres groupes. Les prodiges de tous les domaines ont obtenu un score moyen au 99.6^e percentile au sous-test de mémoire de travail, ce qui est près de 3 écarts-types au-dessus de la moyenne de la population. Les prodiges musicaux ont obtenu les plus hauts scores pour cette

fonction. Ainsi, un point commun des prodiges musicaux serait leur mémoire de travail qui serait très ou extrêmement élevée (Ruthsatz & Urbach, 2012; Ruthsatz, Ruthsatz-Stephens, & Ruthsatz, 2014; Ruthsatz & Detterman, 2003; Comeau, Lu, Swirp, & Mielke, 2018; voir tableau 1).

Les prodiges sont-ils simplement plus intelligents que les autres musiciens? Pas nécessairement, puisque le fonctionnement intellectuel général des prodiges musicaux ne serait pas toujours exceptionnel. Par exemple, LN, dans l'étude de cas de Comeau et al. (2018), a un raisonnement non verbal dans la haute moyenne (85^e percentile), ce qui est certes très bien, mais pas exceptionnel. Un des prodiges musicaux de Ruthsatz et Urbach (2012) a un QI global dans le 70^e percentile, ce qui correspond à la moyenne. Ellen Winner, auteure du livre *Gifted Children* (1996), affirme qu'il n'y a pas beaucoup de preuves que le quotient intellectuel global doive être exceptionnel pour être doué en arts ou en musique, ce qui est corroboré par les scores de QI plus près de la moyenne obtenus par certains d'entre eux (voir tableau 1). Bref, les prodiges tendent à avoir un QI général au-dessus de la moyenne, mais pas nécessairement à l'extrême supérieur du spectre (Ruthsatz, Ruthsatz-Stephens, & Ruthsatz, 2014; Feldman & Morelock, 2020).

Plusieurs pistes peuvent expliquer cette association entre le talent musical exceptionnel et de bonnes habiletés intellectuelles. Il existe effectivement des liens entre la pratique musicale et l'intelligence (p.ex. Swaminathan, Schellenberg, & Khalil, 2017; dos Santos-Luiz, Mónico, Almeida, & Coimbra, 2016; Corrigall, Schellenberg, & Misura, 2013; Schellenberg, 2006). Une hypothèse suggérée dans la littérature est que les fonctions exécutives pourraient être une variable médiatrice entre l'entraînement musical et les habiletés cognitives générales (Schellenberg & Peretz, 2008). Un des modèles des fonctions exécutives y inclut la mémoire de travail (Miyake et al., 2000), qui a été identifiée comme étant très élevée chez les prodiges. Les appuis à cette hypothèse ne seraient toutefois pas concluants jusqu'à maintenant (Schellenberg et Weiss, 2013),

certaines études montrant des résultats négatifs (Bialystok & DePape, 2009). De plus, une méta-analyse suggère l'absence d'un effet de transfert entre la participation à des cours de musique spécifiquement et des gains au niveau des habiletés cognitives générales (Sala & Gobet, 2020). La question semble toutefois toujours débattue au sein de la communauté scientifique, puisqu'une équipe de chercheurs ayant réanalysé les données de Sala et Gobet (2020) y ont plutôt confirmé la présence, quoique modeste, d'un effet de transfert entre la participation à des cours de musique et les habiletés cognitives (Bigand & Tillmann, 2022). Dans tous les cas, une autre explication de l'association entre la pratique musicale et le fonctionnement intellectuel serait que les enfants qui s'engagent dans des activités telles que la musique ont à la base un fonctionnement cognitif généralement plus élevé que les autres (Kragness, Swaminathan, Cirelli, & Schellenberg, 2021; Swaminathan, Schellenberg, & Khalil, 2017). Ainsi, des habiletés préexistantes pourraient être à la source de telles associations plutôt qu'un effet de transfert.

On associe souvent les prodiges à une autre particularité ; le spectre de l'autisme. D'emblée, le diagnostic de trouble dans le spectre de l'autisme se base sur deux domaines de symptômes. Le premier domaine est la communication et les interactions sociales. Le deuxième domaine correspond aux comportements et intérêts restreints ou répétitifs. Ce domaine inclut par exemple des « Intérêts extrêmement restreints et fixes, anormaux soit dans leur intensité, soit dans leur but (p. ex. [...] intérêts excessivement circonscrits ou persévérants) » (Cavanna, Robertson, & Critchley, 2007). Une équipe de chercheurs à Montréal a d'ailleurs observé une haute prévalence de talents exceptionnels chez ceux ayant un trouble du spectre de l'autisme, soit près de 63%, tous domaines confondus. Le talent exceptionnel en musique concernerait 17% d'entre eux (Meilleur et al., 2015). Les « savants musicaux » (Musical savants) associent également des habiletés musicales exceptionnelles au trouble du spectre de l'autisme. Les « savants » ont une habileté exceptionnelle

dans un domaine particulier, qui contraste avec le reste de leur profil intellectuel (Sloboda et al., 1985). Ces habiletés seraient toujours liées à une mémoire exceptionnelle, et seraient présentes chez 1 personne sur 10 atteinte d'un trouble du spectre de l'autisme (Treffert, 2009). Treffert a par ailleurs montré un lien entre un style cognitif orienté vers les détails (detail-focus) et les habiletés spéciales chez des personnes souffrant de ce trouble. Chez les prodiges plus particulièrement, une étude a montré que les prodiges ont une attention aux détails plus élevée que la moyenne (Ruthsatz & Urbach, 2012). L'attention aux détails est une des 5 dimensions mesurées par le Quotient du spectre de l'autisme, un questionnaire destiné à évaluer les traits autistiques dans la population normale (Baron-Cohen et al., 2001). Dans la même étude d'un groupe de prodiges, Joanne Ruthsatz a observé que chez 12 prodiges de différents domaines, quatre d'entre eux avaient reçu un diagnostic de trouble du spectre de l'autisme (TSA; Ruthsatz et al., 2015). Notons que le facteur de risque le mieux établi pour les TSA est l'action des gènes (Rutter, 2005), et que deux autres prodiges dans l'étude avaient un membre de la famille au premier ou au second degré qui était atteint (Ruthsatz et al., 2015). Ce taux est plus élevé que dans la population générale, la prévalence aux États-Unis étant d'environ 1 sur 68 (1,47%; Christensen et al., 2016). La co-occurrence de ces deux phénomènes rares appelle à de plus amples investigations puisqu'ils suggèrent la possibilité d'une étiologie commune. Il faut toutefois garder en tête que les échantillons se recoupent à travers les études de Joanne Ruthsatz, et que les échantillons demeurent de petite taille. Le lien entre l'attention aux détails et le talent pourrait aussi être plus généralisé dans la population. Par exemple, Pedro M. Vital (2009) a rapporté une association entre certains traits autistiques, notamment l'attention au détail, et les « habiletés spéciales » rapportées par les parents de plus de 6 000 enfants de 8 ans (Vital et al. 2009). Les habiletés spéciales étaient ici une mesure auto-rapportée; on demandait aux parents si leur enfant présentait une habileté exceptionnelle en comparaison à lui-même et aux autres enfants, et d'indiquer dans quel domaine. Il n'est donc pas clair que le lien

entre certains traits autistiques, voire même un diagnostic de TSA soit une particularité spécifique aux prodiges. Par ailleurs, bien que le lien entre l'autisme et les prodiges soit une piste neurobiologique intéressante, rappelons que ce ne sont pas tous les autistes qui sont prodiges, et vice versa.

1.3 Les modèles théoriques

Plusieurs modèles théoriques peuvent contribuer à expliquer le phénomène des prodiges musicaux. Premièrement, la théorie de la pratique délibérée mise sur la quantité de pratique accumulée pour expliquer le niveau d'expertise (Ericsson, Krampe, & Tesch-Römer, 1993). Bien que populaire, cette théorie est mise à l'épreuve par l'existence des prodiges. Deuxièmement, des modèles multifactoriels comme le Multifactorial Gene-Environment Interaction Model (MGIM) tentent d'inclure l'ensemble des facteurs pouvant expliquer le développement de l'expertise, qu'ils soient davantage environnementaux ou héréditaires (Ullén, Mosing, & Hambrick, 2017). Je vais présenter chacun d'entre eux dans ce qui suit.

1.3.1 Théorie de la pratique délibérée

Une des théories les plus influentes dans le domaine de l'expertise est celle de la pratique délibérée de Ericsson, introduite à travers l'article *The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance* (Ericsson et al., 1993), aujourd'hui citée plus de 13 400 fois. La pratique délibérée consiste en des activités qui ont été spécialement conçues pour améliorer le niveau de performance actuel, et un expert est défini ici comme une personne qui performe systématiquement mieux que les autres dans un certain domaine (Hambrick et al., 2014). Dans son étude de 1993, Ericsson et ses collègues ont constaté que les musiciens experts, soient 10 violonistes et 12 pianistes, avaient atteint près de 10 000 heures de pratique au début de l'âge adulte, un nombre plus élevé d'heures que les musiciens amateurs du même âge. Inspiré par les résultats de cette

étude, l'auteur Malcolm Gladwell a introduit l'expression de la « règle des 10 000 heures » qui implique qu'il faut accumuler environ 10 000 heures de pratique pour devenir un expert dans un domaine. Suivant cette théorie, les prodiges musicaux pratiqueraient beaucoup plus que leurs pairs. Bien que leur jeune âge suggère qu'ils auraient probablement accumulé moins d'heures de pratique que les professionnels, cette donnée est inconnue. Selon Ericsson, un certain type de pratique, soit la pratique délibérée, est la condition nécessaire et suffisante pour devenir un expert.

1.3.2 Au-delà des effets de la pratique – critique de la pratique délibérée

La théorie de la pratique délibérée est critiquée par de nombreux chercheurs en psychologie (Hambrick et al., 2014). Certains considèrent qu'Ericsson, bien qu'ayant démontré l'importance de la pratique délibérée, n'a pas su démêler l'entraînement et les habiletés innées (Winner, 2000; Hambrick et al., 2016). On reproche aussi le fait que la pratique délibérée est une notion mal définie dont les paramètres fluctuent, et ce sans justification scientifique claire. Par exemple, selon les articles, la pratique délibérée est parfois définie comme conçue exclusivement par un enseignant ou entraîneur, et à d'autres moments, la contribution de l'enseignant n'est pas nécessaire pour que la pratique délibérée soit considérée comme telle (Hambrick, Macnamara, & Oswald, 2020).

Nul ne doute que la pratique soit essentielle pour développer la compétence de l'individu; il y a de nombreuses connaissances et techniques à acquérir pour maîtriser un instrument de musique. Il s'agit plutôt de l'effet inter-individuel de la pratique sur les habiletés qui est débattu; un individu ayant pratiqué plus qu'un autre n'est pas nécessairement proportionnellement meilleur (Hambrick et al., 2020). Par exemple, les chercheurs Gobet et Campitelli (2007) ont montré qu'il existe une grande variabilité dans le nombre d'heures de pratique chez les experts aux échecs, allant de 728 à 16 000 heures de pratique avant de devenir maître d'échecs. Une méta-analyse a également montré que l'expertise n'est expliquée que partiellement par la quantité de pratique (Macnamara,

Hambrick, & Oswald, 2014). En musique plus spécifiquement, les auteurs ont déterminé que seulement 21% de la variance dans la performance est expliquée par la quantité de pratique, laissant donc 79% expliquée par autre chose (Macnamara et al., 2014; Macnamara, Hambrick, & Oswald, 2018). Les opposants à la théorie d'Ericsson pensent donc que la pratique, bien que nécessaire, est insuffisante pour expliquer l'expertise. Une combinaison d'aptitudes « naturelles » et de pratique expliqueraient l'expertise ou le talent, et non seulement un ou l'autre de ces deux ingrédients. Dans le même ordre d'idée, Robert Plomin résume ceci dans l'avant-propos d'un ouvrage sur la science de l'expertise : “Training without talent will not take you to the top tiers of expertise, nor will talent without training” (Hambrick, Campitelli, & Macnamara, 2018; pp. xiv).

La frontière elle-même entre ce qui est considéré comme inné ou acquis est floue. Ainsi, la pratique, un élément habituellement catégorisé comme de l'expérience (c.-à-d., acquis), serait influencée par la génétique (Mosing, Madison, Pedersen, Kuja-halkola, & Ullén, 2014). En effet, même dans le cas où les prodiges se montreraient davantage enclins à pratiquer que leurs pairs, on pourrait se demander ce qui sous-tend cette plus grande tendance à pratiquer leur instrument. Une étude effectuée auprès de plusieurs milliers de jumeaux a montré que les gènes ont une influence sur la pratique musicale (Mosing et al., 2014). Les résultats de cette étude montrent que la pratique musicale serait largement héréditaire, c'est-à-dire que 40 à 70% des variations associées aux heures de pratique musicale seraient liées à la génétique. Ceci implique que la pratique ne peut être considérée comme un facteur strictement acquis.

En ce qui a trait aux prodiges plus particulièrement, ceux-ci ont-ils simplement pratiqué beaucoup plus de leurs pairs comme le prédirait la théorie de la pratique délibérée? L'âge auquel ils atteignent un aussi haut niveau de performance suggère d'emblée que non, mais il n'existe pas de données claires pour répondre à la question. Gagné & McPherson (2016) proposent que la

définition des prodiges pourrait être basée sur la *vitesse* d'apprentissage. Or, on ne sait pas quelle est la quantité d'heures de pratique qu'il faut pour atteindre le statut de prodige, ni la réelle vitesse d'apprentissage des prodiges. On sait toutefois que les prodiges progressent plus rapidement que leurs pairs dans le cursus musical. Par exemple, le jeune prodige de la contrebasse décrit plus tôt avait 12 ans lorsqu'il a atteint un niveau de contrebasse habituellement atteint par les jeunes vers 17 ou 18 ans (Janzen et al., 2016). Comeau et al. (2017) ont exploré la vitesse d'apprentissage de jeunes prodiges du piano en évaluant le progrès au sein des niveaux du programme Royal Conservatory Piano Syllabus (RCM) selon leur âge. Ils ont pu déterminer que les prodiges progressent significativement plus rapidement à travers les niveaux du RCM comparativement à un grand échantillon d'étudiants en musique non-prodiges. Ainsi, les prodiges progressaient d'environ 2 niveaux par année, comparativement à moins d'un niveau par année pour les élèves normaux. Par contre, ces exemples de progression rapide ne tiennent pas compte du nombre d'heures de pratique. Si un musicien pratique deux fois plus que la moyenne des musiciens, alors sa progression deux fois plus rapide pourrait être tout simplement expliquée par sa plus grande pratique. En d'autres mots, on ne pourrait pas dire que ce musicien apprend plus rapidement en un temps donné. La présente thèse tentera d'apporter des réponses à cette question jusqu'alors en suspens.

1.3.3 Modèle multifactoriel de l'interaction gène-environnement (MGIM)

Le modèle multifactoriel de l'interaction gène-environnement est un modèle introduit par Ullén, Hambrick, & Mosing (2016). Ce modèle décrit différents éléments contribuant au développement de l'expertise à partir de données issues de la recherche scientifique empirique. Ainsi, le modèle présume que différents traits tels que la motivation, les intérêts, la personnalité et différentes habiletés influencent le choix du domaine d'expertise ainsi que l'intensité de la pratique.

En retour, la pratique a comme effet de modifier le corps ainsi que les réseaux neuronaux recrutés par l'activité. Certaines prédispositions peuvent également avoir un impact direct sur le développement de l'expertise. L'ensemble de ces variables sont sujettes aux influences complexes de la génétique et de l'environnement ainsi que de leur covariation et/ou interaction.

Tel qu'abordé plus tôt, les prodiges musicaux sont d'un intérêt scientifique particulier. En effet, l'apparition précoce de leurs habiletés exceptionnelles permet de supposer que des facteurs innés jouent un rôle non négligeable dans l'émergence de leur talent. Les prodiges sont donc un paradigme idéal pour étudier les prédispositions à l'origine du talent musical (Peretz, 2016).

Différents éléments du modèle multifactoriel nous apparaissent particulièrement pertinents vis-à-vis le développement du talent musical et seront détaillés ci-après.

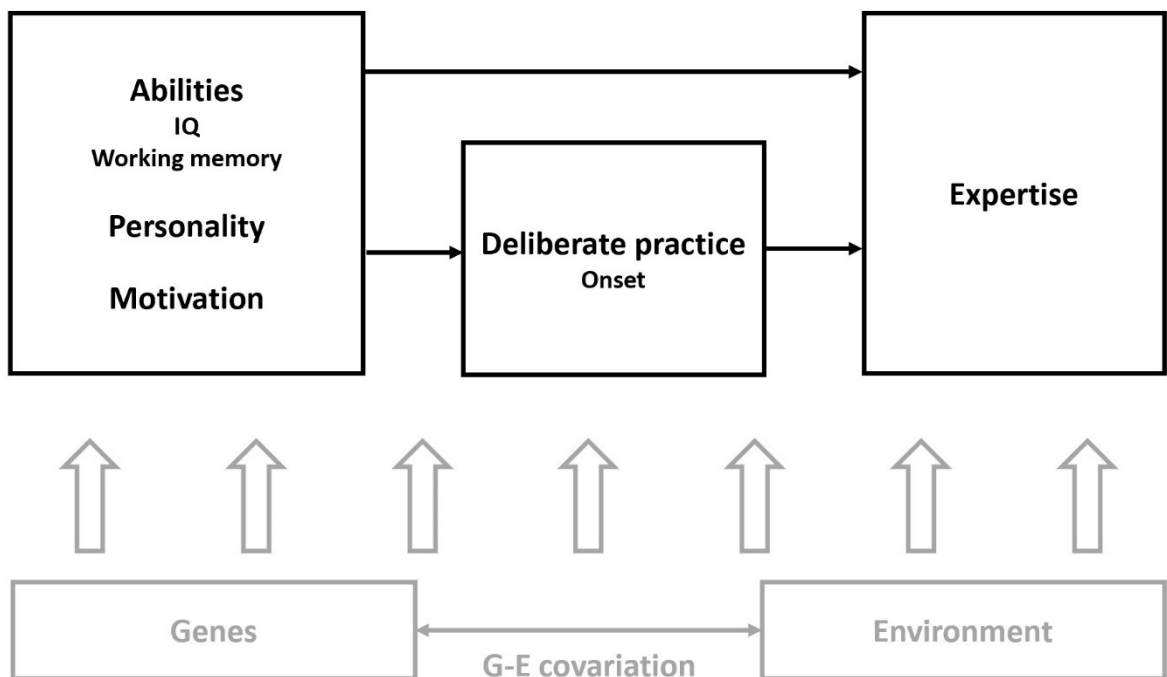


Figure 2. Version adaptée du Modèle d'interaction multifactorielle gène-environnement (MGIM), proposé par Ullén et al. (2016). Les éléments évalués dans la présente thèse sont indiqués en noir.

D'abord, un élément qui n'est pas explicitement présent dans le modèle multifactoriel de l'interaction gène-environnement (MGIM) mais que nous considérons pertinent pour l'étude des prodiges est l'âge de début de la pratique. Cet aspect nous apparaît important puisque les prodiges musicaux sont caractérisés par la précocité de leurs exploits. De plus, l'âge de début de la pratique musicale a un rôle sur l'impact que peut avoir la musique sur le cerveau (Merrett, Peretz, & Wilson, 2013). Plusieurs chercheurs parlent d'une « période sensible », pendant laquelle l'exposition à l'entraînement musical a un impact à long terme sur le cerveau (Zatorre, 2003; Watanabe et al., 2007; Bailey et Penhune, 2010). Par exemple, on a montré que les musiciens ayant commencé l'apprentissage de la musique avant 7 ans performaient mieux à une tâche de séquence motrice chronométrée (Watanabe et al., 2007). Une autre étude a montré des différences structurelles dans le cerveau des musiciens qui ont commencé leur entraînement avant 7 ans, c'est-à-dire que la portion antérieure de leur corps calleux est plus grande que celle des musiciens ayant commencé plus tard ainsi que celle des non-musiciens (Schlaug et al., 1995). Outre l'impact que peut avoir la pratique sur leur cerveau, les prodiges pourraient avoir certaines prédispositions cérébrales innées, qui sont plutôt déterminées par les gènes.

D'ailleurs, une pratique musicale précoce au cours d'une période sensible, vers l'âge de 3 à 5 ans mène parfois à un autre phénomène rare ; l'oreille absolue (Miyazaki et al., 1988). L'oreille absolue témoigne d'une association automatique entre un son (une note de musique) et une étiquette (le nom de la note), et ce sans référence préalable. Jenkins (2005) affirme que les prodiges montreraient fréquemment l'oreille absolue, quoiqu'il n'existe pas de données claires concernant les prodiges et l'oreille absolue à ce jour. De plus, selon Miller (1999), les musiciens autistes

(savants musicaux) étudiés jusqu'alors possèderaient tous l'oreille absolue. Selon Dohn et al. (2012), les musiciens ayant l'oreille absolue auraient des traits autistiques plus importants, tels que mesurés par le quotient du spectre de l'autisme (AQ; Baron-Cohen et al., 2001). Le phénomène de l'oreille absolue s'apparente grandement à celui de la synesthésie, qui est aussi une association perceptuelle arbitraire entre deux modalités (par exemple, les lettres sont perçues comme ayant une certaine couleur). Les deux seraient liés entre eux, puisque les gens ayant l'oreille absolue seraient plus fréquemment synesthètes (20%) comparativement à la population générale (4%; Gregersen et al., 2013). Les deux phénomènes sont rares : l'oreille absolue serait présente chez environ 7% des étudiants en musique aux États-Unis (Gregersen et al., 1999), et la prévalence de la synesthésie est estimée de 0.2 à 4%, selon le type de synesthésie (Ward, 2013). Les deux sont des traits qui se transmettent au sein des familles et sont donc héréditaires (Baharloo et al., 2000; Barnett et al., 2008). Étant donné les liens existants entre l'oreille absolue/synesthésie, la pratique tôt dans la vie et les traits autistiques, et étant donné qu'il n'existe pas de données empiriques concernant la prévalence de l'oreille absolue et de la synesthésie chez les prodiges musicaux, cet aspect sera investigué dans la présente thèse.

La propension des prodiges à pratiquer dès un jeune âge soulève aussi la question de la motivation. La motivation est d'ailleurs une des dimensions psychologiques incluses dans le modèle de Ullén et al. (2016), sans y être clairement opérationnalisée. La motivation constitue ce qui nous donne l'élan d'agir et nous permet d'atteindre nos objectifs. Elle peut pousser par exemple les musiciens à pratiquer afin de maîtriser une pièce, de donner un concert, ou de participer à une compétition. Cette dimension apparaît particulièrement intéressante dans le cas des prodiges, qui peuvent pratiquer intensément à un jeune âge, et qui ont été décrits comme ayant une « rage de maîtriser » (Winner, 2000). Des chercheurs ont montré que la motivation davantage *interne* chez

les musiciens était associée à des séances de pratique plus fréquentes (Evans & Bonneville-Roussy, 2016). Selon la théorie de l'auto-détermination, il existe différents types de motivation, qui vont de l'amotivation (l'absence de motivation), à la motivation extrinsèque qui se décline en différents niveaux d'*internalisation* ou d'autonomie (de la régulation externe à la régulation intégrée), et finalement à la motivation intrinsèque qui survient lorsque l'activité concernée nous procure directement du bien (Ryan & Deci, 2000). L'expertise requiert de la pratique, et puisque la pratique n'est pas nécessairement source de plaisir (Ericsson et al., 1993), les musiciens ont besoin de motivation supplémentaire pour avoir l'élan de pratiquer. Des mesures auto-rapportées de la motivation à pratiquer qui découlent de la théorie de l'auto-détermination existent, par exemple la *Piano Autonomous Motivation Scale* (PAMS ; Comeau, Huta, & Liu, 2015), de laquelle nous nous sommes inspirés dans la présente thèse. Puisque cela n'a jamais été fait, le degré et le type de motivation à pratiquer l'instrument seront mesurés de manière auto-rapportée chez les prodiges musicaux.

La tendance à expérimenter un état de *flow* lors de la pratique de leur instrument pourrait également être un facteur contributif à la tendance à pratiquer des prodiges. Le flow est un état psychologique qui survient lors de l'accomplissement d'une tâche difficile, mais à la hauteur de nos capacités (Csikszentmihalyi, 1990). Cet état se caractérise par différentes dimensions, dont : une concentration intense, une impression de contrôle, l'impression que l'instrument est en continuité avec son corps, et un grand plaisir ressenti. Le flow se mesure de manière auto-rapportée à l'aide d'un questionnaire, par exemple le Dispositional Flow Scale-2 (DFS-2 ; Jackson, Eklund, & Leatherman, 2004). Cet état particulier a été associé à davantage de pratique quotidienne chez les pianistes, c'est-à-dire que les musiciens qui expérimentent davantage de flow (mesuré à l'aide du DFS-2) ont aussi tendance à rapporter davantage d'heures de pratique quotidienne (Marin &

Bhattacharya, 2013). Dans une étude de jumeaux comprenant plus de 10 500 individus, un lien a été aussi été révélé entre l'expérience de flow musical mesuré à l'aide du *Swedish Flow Proneness Questionnaire* (SFPQ ; Fredrik Ullén et al., 2012) et le nombre total d'heures de pratique estimé, et ce au-delà de la motivation intrinsèque mesurée à l'aide du *General Motivation Scale* (Guay, Mageau, & Vallerand, 2003) et du QI (Butkovic, Ullén, & Mosing, 2015). Le flow comme tel se distinguerait donc de la motivation, et serait un prédicteur de la pratique musicale.

Serait-il possible que les prodiges soient aussi caractérisés par certains traits de personnalité? La chercheuse canadienne Kathleen Corrigan s'est intéressée aux liens entre la personnalité et la pratique musicale. Les participants dans leur première étude étaient 118 adultes et 167 jeunes âgés entre 10 et 12 ans. On a mesuré leur personnalité à l'aide du questionnaire de personnalité du Big Five, leur fonctionnement intellectuel à l'aide du Wechsler Abbreviated Scale of Intelligence (WASI Test), leur expérience musicale (nombre d'année de pratique et nombre d'années de leçons privées) et les données démographiques à partir de questionnaires. À l'aide d'une régression multiple, Corrigan et al. (2013) ont montré que la dimension de personnalité de l'ouverture à l'expérience, telle que mesurée par le biais du questionnaire de personnalité du Big 5, influence la propension à pratiquer la musique, et ce même si les habiletés cognitives et les données démographiques sont contrôlées (Corrigan et al., 2013). L'ouverture à l'expérience, telle que décrite par le modèle de personnalité du Big Five et mesurée à l'aide de questions à choix multiples, est associée notamment à l'imagination, à l'originalité et à la curiosité. Les autres dimensions du modèle sont le caractère consciencieux, l'extraversion, l'agréabilité et le névrosisme. Ce trait étant lié à l'engagement en musique, il pourrait être un facteur contribuant aux prodiges.

Comme il a été mentionné plus tôt, les prodiges montreraient plus de traits autistiques que la moyenne, particulièrement au niveau de l'attention aux détails telle que mesurée dans le quotient du spectre de l'autisme (AQ; Ruthsatz et al., 2014). Les traits autistiques apparaissent opposés au trait d'ouverture à l'expérience tel que mesuré par l'inventaire de personnalité du Big Five, qui serait plus marqué chez ceux qui s'engagent en musique. L'ouverture à l'expérience inclut le goût de l'aventure, de la variété des expériences, et de la nouveauté. Au contraire, les traits autistiques incluent notamment une intolérance au changement, ou un inconfort lorsque la routine est dérangée. On peut penser que les prodiges tendront vers l'un ou l'autre de ces traits, mais pas les deux à la fois. Plusieurs études ont examiné le lien entre les traits de personnalité et les traits autistiques dans la population générale (Austin, 2005; Wakabayashi, Baron-Cohen, & Wheelwright, 2006) et chez des participants ayant un diagnostic de syndrome d'Asperger (Soderstrom et al., 2002). Dans la population générale, il n'y a pas de relation inverse entre les traits autistiques et l'ouverture à l'expérience (Austin, 2005; Wakabayashi et al., 2006). La recherche de nouveauté tend toutefois à être faible chez les adultes ayant un trouble dans le spectre de l'autisme (Soderstrom & Gillberg, 2002). L'ouverture à l'expérience et les traits autistiques ne semblent donc pas incompatibles dans la population générale, et il est possible que les prodiges présentent ces deux traits à la fois. Dans le cas où des prodiges présenteraient également un trouble dans le spectre de l'autisme, il serait possible que l'ouverture à l'expérience soit plus faible. Ainsi, dans cette thèse, la présence d'un trouble dans le spectre de l'autisme sera questionnée, et la personnalité et les traits autistiques seront mesurés auprès des prodiges et de leurs contrôles.

Notons finalement qu'il y a d'autres modèles théoriques qui existent concernant le talent exceptionnel (ou douance) dans un domaine particulier, comme la musique. Nommons par exemple le modèle des trois anneaux de Renzulli (Renzulli, 1978), la théorie des intelligences multiples

d'Howard Gardner (Gardner, 2011), ou le modèle intégratif du développement du talent de Francoys Gagné (Gagné, 2013). Ces modèles sont pertinents dans des contextes pédagogiques, notamment, mais peuvent être plus difficiles à opérationnaliser au-delà de ce qu'offre le modèle multifactoriel de l'interaction gène-environnement décrit ci-haut. Le lien entre les résultats à la présente thèse et certains de ces autres modèles théoriques sera abordé dans le troisième chapitre.

1.4 Objectifs de recherche

La présente thèse est une des rares à s'intéresser à un échantillon de nombreux prodiges musicaux, et est la toute première à utiliser un groupe contrôle. L'objectif général consiste à identifier les facteurs individuels contribuant au phénomène des prodiges musicaux. Les mesures pertinentes déjà identifiées dans la littérature seront étudiées chez des prodiges et chez des sujets contrôles, musiciens, non-musiciens ou amusiques.

En premier lieu, une étude transversale a comme objectif de déterminer les facteurs psychologiques qui caractérisent les prodiges musicaux. Cette étude est effectuée auprès de prodiges, qui se sont tous démarqué de leurs pairs avant 14 ans, soit 1) en gagnant un prix national/international ou plusieurs prix régionaux, soit 2) en raison d'une reconnaissance spéciale de leur talent par exemple à travers des apparitions médiatiques. Les prodiges ont été appariés à des non-musiciens ainsi que de musiciens contrôles ayant accumulé un nombre total d'heures de pratique équivalent mais ayant commencé soit vers environ 6 ans comme les prodiges, ou plus tard que les prodiges, vers environ 10 ans. Tous les participants sont appariés en termes d'âge et d'années d'éducation. Les principales mesures sont le temps de pratique annuel depuis le début de la pratique instrumentale, la personnalité (Big Five), la motivation, le flow lors de la pratique instrumentale, et le quotient intellectuel. Étant donné cet appariement, les différences qui

ressortiront de la comparaison entre les groupes sur les différentes mesures pourront être associées à ce qui fait l'essence du prodige musical; la précocité du talent musical exceptionnel.

En second lieu, nous étudierons un virtuose de la guitare atteint du syndrome de Gilles de la Tourette, et qui affirme pouvoir apprendre très rapidement de nouvelles pièces et avoir une mémoire exceptionnelle. Nous tenterons donc de déterminer si ce prodige peut apprendre plus rapidement que ses pairs une nouvelle pièce en un temps donné, et à quel(s) facteur(s) un tel avantage pourrait être associé. La quantité de notes apprises sera calculée, et qualité de la production finale sera appréciée par des experts. Ensuite, le prodige ainsi que les contrôles jouant du même instrument ou non seront comparés à l'aide de différentes mesures telles que les habiletés d'apprentissage d'une mélodie chantée, les habiletés de perception musicale, l'apprentissage d'une liste de mots, les habiletés intellectuelles et la propension à expérimenter un état de flow lors de la pratique musicale. Étant donné les particularités neurologiques du participant principal (Syndrome de Gilles de la Tourette, épilepsie), différentes mesures cérébrales seront également comparées entre le participant principal et ses contrôles.

Chapitre II – Méthodologie et résultats

Article 1 : What Makes Musical Prodigies?

Chanel Marion-St-Onge, Michael W. Weiss, Megha Sharda and Isabelle Peretz*

Department of Psychology, International Laboratory for Brain, Music, and Sound Research,
University of Montreal, Montreal, QC, Canada

Publié dans *Frontiers in Psychology*

Abstract

Musical prodigies reach exceptionally high levels of achievement before adolescence. Despite longstanding interest and fascination in musical prodigies, little is known about their psychological profile. Here we assess to what extent practice, intelligence, and personality make musical prodigies a distinct category of musician. Nineteen former or current musical prodigies (aged 12–34) were compared to 35 musicians (aged 14–37) with either an early (mean age 6) or late (mean age 10) start but similar amount of musical training, and 16 non-musicians (aged 14–34). All completed a Wechsler IQ test, the Big Five Inventory, the Autism Spectrum Quotient, the Barcelona Music Reward Questionnaire, the Dispositional Flow Scale, and a detailed history of their lifetime music practice. None of the psychological traits distinguished musical prodigies from control musicians or non-musicians except their propensity to report flow during practice. The other aspects that differentiated musical prodigies from their peers were the intensity of their practice before adolescence, and the source of their motivation when they began to play. Thus practice, by itself, does not make a prodigy. The results are compatible with multifactorial models of expertise, with prodigies lying at the high end of the continuum. In summary, prodigies are expected to present brain predispositions facilitating their success in learning an instrument, which could be amplified by their early and intense practice happening at a moment when brain plasticity is heightened.

Keywords: musical prodigies, musical talent, expertise, achievement, practice, intelligence, personality

Introduction

CH plays the violin exceptionally well. He's a 26-year-old acclaimed professional musician who studied at Juilliard, has won numerous national and international competitions, and currently plays on a Stradivarius violin. He made his orchestral debut at 7 years old. A musician like CH, who showed “superior performance within a specific domain” before adolescence, is considered to be a musical prodigy in the present study (see Supplementary Table 1 for definitions). Here, in the largest sample of exceptional musicians considered so far, we examine non-musical traits, such as practice, autistic traits, and intelligence, that have been associated with musical prodigiousness.

In doing so, we endorse the Multifactorial Gene–Environment Interaction Model proposed by Ullén et al. (2016) (Figure 1), which assumes complex interactions between genes, environment, practice behavior, and psychological traits (Mosing et al., 2014).

Practice is obviously central to the development of any skill, and musical skill in particular. From the influential deliberate practice perspective, practice is the only important factor in acquiring expertise (Ericsson et al., 1993). Other perspectives hold that practice alone is not sufficient. In a meta-analysis on the relationship between practice and performance, Macnamara et al. (2014) found that the variance in music performance explained by deliberate practice is 21%, which leaves the majority of variance unexplained. Complicating matters further, individuals vary considerably in the amount of practice needed to reach expert-level performance (Ackerman, 2014). For example, in chess, the minimum amount of deliberate practice required to achieve master level is around 3,000 h, but some players accumulate as many as 20,000 h without reaching that status (Campitelli and Gobet, 2011). Thus, the relation between practice and performance is not straightforward.

Practice is not a purely environmental factor. Genetic predispositions also come into play. There is no difference, for example, in music perception abilities of monozygotic twins with differing amounts of musical practice (Mosing et al., 2014). The age of onset of musical training can also interact with genetic differences in brain structure and function (Herholz and Zatorre, 2012). A confluence of neurogenetic factors might influence practice, as well as musical abilities like the precision of motor timing in sequential tapping, complicating the relationship between practice and musical achievement (Ullén et al., 2015).

The Multifactorial Gene–Environment Interaction Model (MGIM; Ullén et al., 2016; Figure 1 for an adapted version) of music proficiency and expertise is arguably the most comprehensive model of musical talent proposed so far. The model is evidence-driven in the sense that it emerges from recent findings in the field of expertise. It incorporates the roles of multiple factors in expertise development, such as practice required to reach a certain level of performance, personality traits, IQ, and working memory.

Motivation to practice is another psychological dimension considered in the model suggested by Ullén et al. (2016), but often ignored in neurogenetic studies of musicality. This trait seems especially relevant to prodigies, who have been described as possessing a “rage to master,” or a drive fueling their interest and capacity to practice for extended periods of time (Winner, 2000). As Gagné and McPherson (2016) note, the terminology used by Winner encompasses various concepts such as flow, obsessive passion, and intrinsic motivation. Indeed, the tendency to experience flow may contribute to prodigies’ motivation. Flow is a psychological state characterized by intense concentration and a heightened sense of control, and it constitutes an experience that is inherently rewarding (Nakamura and Csikszentmihalyi, 2009). The experience of flow when playing music correlates with amount of music practice (Butkovic et al., 2015; Marin

and Bhattacharya, 2013), but flow itself is not a predictor of achievement (i.e., which musician will win a competition; Marin and Bhattacharya, 2013). Moreover, personality traits like openness to experience and musical flow share genetic influence (Butkovic et al., 2015). Accordingly, intrinsic motivation, frequency of practice, propensity to experience flow during practice, and reward experienced with music, will be examined here.

Besides practice and motivation, the presence of autistic traits could distinguish prodigies from their peers. Autistic traits are measured by metrics such as the Autism Spectrum Quotient (AQ; Baron-Cohen et al., 2001). A defining autistic trait is attention to detail, which refers to the propensity to focus attention on detailed aspects of sensory information, and which may be more prevalent among musical prodigies (Ruthsatz and Urbach, 2012). Because autistic traits are independent from the personality components of the Big Five inventory (Wakabayashi et al., 2006; Austin, 2005), all participants in the present study will complete the Autism Spectrum Quotient questionnaire in addition to the Big Five Inventory.

Enhanced intelligence is another trait often associated with musical training (for reviews, Schellenberg and Weiss, 2013; Miendlarzewska and Trost, 2014; Swaminathan and Schellenberg, 2019), but most research has focused on typical musicians. Whether musical prodigies, who represent the extreme of musical achievement, would obtain correspondingly high IQ scores is unclear. Support for this idea comes from the study of a relatively large sample of prodigies ($n = 18$), of which eight were musical prodigies. The musical prodigies obtained a high IQ ($M = 129$) compared to the general population, with especially high scores for working memory (Ruthsatz et al., 2014). A more recent case study conducted with a musical prodigy also showed superior working memory (Comeau et al., 2018).

Empirical research on musical prodigies is scarce. Case studies have investigated aspects of musical and cognitive abilities in individual musical prodigies (Comeau et al., 2018; Ruthsatz and Detterman, 2003; Dalla Bella et al., 2016). The typical method compares a prodigy to a control group matched on age or musical training, or uses normalized tests rather than a control group. For example, there are many reports of prodigies who possess absolute pitch – the ability to automatically identify a note without prior reference (Gagné and McPherson, 2016). However, its prevalence in prodigies relative to non-prodigy musicians has not been empirically assessed (Comeau et al., 2018). To our knowledge only one research group has recruited multiple prodigies for study, and these samples were recruited across different domains of expertise (e.g., music, visual arts, and maths), and were not compared to a control group (Ruthsatz and Urbach, 2012; Ruthsatz et al., 2014). No study to date has compared a group of musical prodigies to control groups matched on musical experience.

In the present study, we assess the extent to which prodigious talent exists on a continuum with the trajectory of typical musicians, or alternatively, constitutes a distinct category. We may assume that predispositions play an outsized role in the achievements of prodigies because they achieve so much so early in life, but the nature of those predispositions and their link with behavior and eventual achievement is unknown. In keeping with the MGIM framework (Ullén et al., 2016), we ask whether the prodigies' expertise (or achievement) is influenced by psychological traits like cognitive abilities, personality, motivation, and deliberate practice behavior, and whether there is a link between practice and psychological traits. We also consider, as an alternative view, whether the prodigy phenomenon can be explained by a simpler framework such as deliberate practice (Ericsson et al., 1993).

The study of prodigies may help to identify which ingredients are critical to reach exceptional performance in typical musicians. To answer these questions, we compared four groups of adolescent or adult participants, former or current prodigies, musicians who started training early in childhood, musicians who started training later in childhood, and non-musicians.

Material and methods

Participants

We recruited 19 current or former prodigies. Six of them were aged 12 to 14 at the moment of testing and 13 were adult participants who were prodigies in their youth (hereafter, prodigies). They were recruited through online searches, references from professional musicians and music teachers, and public announcements. Detailed demographic and musical experience information are listed in Tables 1, 2, respectively. Classification as prodigy was established by meeting at least one of the following criteria before age 14: (1) high achievement in performance, like winning a first prize in a national or international competition, or winning multiple regional competitions, or (2) special recognition of talent through television or documentary appearances, or orchestral debut (as used in Ruthsatz and Urbach, 2012). Their achievements, listed in Supplementary Table 2, were confirmed in a semi-structured interview. Two prodigies (siblings) were diagnosed with autism spectrum disorder early in life.

There were three control groups, with each group differing in their musical experience. Early-trained musicians (N = 16; hereafter, early-trained) were similar to prodigies in age of onset of musical training and years of musical experience but did not show exceptional talent before the age of 14. Late-trained musicians (N = 19; hereafter, late-trained) began to play their instrument later than the prodigies and early-trained musicians, on average, while accumulating a similar

number of years of musical training at the time of testing. Early-trained musicians were matched individually to prodigies on age of onset of musical experience (± 2 years). Late-trained musicians had a delayed onset of training after age 7 and were also matched on years of musical experience. Before 18 years old, the majority of control musicians (30 out of 35 control musicians) did not report any achievements such as those considered for the prodigy criteria.

During the interview conducted with each musician, we collected practice data on the daily or weekly estimated number of hours of deliberate practice. For participants under age 16, parents were present during the interview. Yearly estimated number of hours of practice were calculated by summing the number of hours of daily or weekly practice reported by each participant for each year of musical experience, as in other research (Ericsson et al., 1993). For example, if a participant reported practicing 20 min per day and 6 days per week, this amounts to 2 h per week for 52 weeks, and 104 h for that particular year. For each musician, we also calculated accumulated deliberate practice by summing the yearly amount of practice from the onset of musical experience. Detailed information is listed in Table 2.

Sixteen non-musicians who had less than three years of musical experience and were not currently active musically were also tested. All non-musicians performed within the normal range on the online test for the evaluation of amusia (Peretz and Vuvan, 2017). Because musical aptitude may vary among non-musicians, we used a test of basic musical perception skills, the Musical Ear Test (Wallentin et al., 2010). Non-musicians obtained a mean of 72.2% correct ($SD = 11.9$) in the melody perception subtest and a mean of 72.7% correct ($SD = 8.3$) in the rhythm perception subtest. Their performance is comparable to the non-musicians in the original paper, with means of 69.7% ($SD = 11.1$) and 70.6% ($SD = 8.0$), respectively (Wallentin et al., 2010).

Other factors known to affect performance on behavioral tests and questionnaires, such as age, sex, and education, were matched across all groups (see Table 1). Most of the sample was Caucasian (48 out of 70). Seven out of 19 prodigies reported being of Asian ethnicity (South or East).

Due to time constraints and early changes in the protocol, there is missing data for one late-trained musician (Barcelona Music Reward Questionnaire), one early-trained musician (visual working memory), and one prodigy (motivation). Moreover, one prodigy and one late-trained musician were administered an abbreviated version of the IQ measure (WASI) instead of the full-scale IQ (WAIS-IV) because of time constraints. Accordingly, IQ index values are unavailable for these two participants. There are missing data for 8 participants on the measure of flow (2 prodigies, 4 early-trained, and 2 late-trained), because the measure was administered remotely and some did not reply.

Materials and procedure

Online questionnaire

Prior to their lab visit, participants completed an online questionnaire. The first section contained consent and demographics information. The online questionnaire also contained sections on absolute pitch, reward, motivation to play their instrument, and personality traits (see descriptions below). For participants who were minors, parents completed the consent form and demographics information; the remaining sections were completed by the participants themselves.

Reward, Motivation, and Flow Questionnaires

The Barcelona Music Reward Questionnaire (BMRQ; Mas-Herrero et al., 2013) consists of 22 questions that assess reward associated to music in five dimensions: music seeking (e.g., I'm

always looking for new music), emotion evocation (e.g., I get emotional, listening to certain pieces of music), mood regulation (e.g., Music helps me chill out), social reward (e.g., Music makes me bond with other people), and sensory-motor (e.g., Music often makes me dance). Answers were provided on a 5-point Likert scale, with 1 meaning Completely disagree and 5 meaning Completely agree.

To assess musicians' motivation to play their instrument, we selected items from the questionnaire of Desrochers et al. (2006) which did not exhibit floor or ceiling effects (i.e., with a rate equal or lower than 40% of extreme values). These items are listed in Table 3.

In addition, most participants filled a questionnaire assessing flow during musical practice, the Dispositional Flow Scale 2 (Jackson and Eklund, 2004). This questionnaire consists of 36 items assessing flow, using a 5-point scale (1 = never to 5 = always). The global score was obtained by calculating the mean score of all items. Examples of items, all following the statement "When I practice my instrument. . .," include: "My attention is focused entirely on what I am doing," "I really enjoy the experience," "It feels like time goes by quickly," "I am challenged, but I believe my skills will allow me to meet the challenge."

Personality Traits

The Autism Spectrum Quotient (AQ; Baron-Cohen et al., 2001) consists of 50 items meant to measure five dimensions of the autistic profile: social skill (e.g., I would rather go to a library than a party), attention switching (e.g., I prefer to do things the same way over and over again), attention to detail (e.g., I tend to notice details that others do not; I am fascinated by numbers), communication (e.g., I frequently find that I don't know how to keep a conversation going), and imagination (e.g., I find it difficult to imagine what it would be like to be someone else). Answers

were provided using a scale with four options: definitely agree, slightly agree, slightly disagree and definitely disagree.

The Big Five Inventory (John et al., 1991) contains 45 questions constructed to measure five different dimensions of personality: openness to experience (e.g., Likes artistic and creative experiences), conscientiousness (e.g., Does things carefully and completely), extraversion (e.g., Is outgoing, sociable), agreeableness (e.g., Is considerate and kind to almost everyone), and neuroticism (e.g., Worries a lot). Answers are provided using a 5-point Likert scale, with 1 meaning Disagree strongly and 5 meaning Agree strongly.

Intellectual Quotient and Working Memory

Standardized tests of intellectual quotient (IQ) were administered to all participants. For musicians, the Wechsler Adult Intelligence Scale – Fourth Edition (WAIS-IV; Wechsler, 2008) was administered to participants aged 17 or older, and the Wechsler Intelligence Scale for Children – Fourth Edition (WISC-IV; Wechsler, 2003) was administered to participants aged 16 or younger. These batteries provide a global IQ score as well as 4 index scores: verbal comprehension, perceptual reasoning, working memory, and processing speed. For non-musicians, an abbreviated measure of IQ was used, the Wechsler Abbreviated Scale of Intelligence (WASI; Wechsler, 1999) with 2 (N = 10) or 4 subtests (N = 15), which provide a full-2 or full-4 IQ score, respectively. WASI versions vary because the protocol was changed for time-saving purposes. The WASI was used for non- musicians because IQ is well known in the normal population, obviating the need for more extensive evaluation. Global IQ and indices for the WAIS-IV and WISC-IV were calculated using the summation of the subtests administered, and normed using the age-appropriate tables of the WAIS-IV, WISC-IV, and WASI. The mean in the normal population is 100 points, and one standard deviation corresponds to 15 points.

Since the WAIS-IV subtests of working memory are only auditory-verbal and because visual working memory could be involved in music learning (e.g., in sight-reading; Mainz and Hambrick, 2010), all participants completed a test of spatial working memory from the Wechsler Memory Scale, Third Edition (WMS-III; Wechsler, 2001). In this task, the experimenter points to blocks on a plank in a specific sequence, and the participant must point to them in the same order. The procedure is repeated with the instruction to point in the reverse order. The number of blocks increases until the participant errs. Raw scores (i.e., number of sequences correctly recalled) were calculated and used in the analyses, with higher scores indicating better spatial working memory. The tests were administered individually in a quiet, closed room on the campus of the University of Montreal.

Results

Prodigy status was reached at a mean age of 10.3 years ($SD = 1.8$; range = 7–13), after a mean of 5.4 years of musical experience ($SD = 1.3$; range = 3–8) and an accumulated average amount of practice of 2,364 h, although variability was large (range = 187– 7,357 h). Individual data are presented in Supplementary Figure 1. At the time of testing, prodigies accumulated a total amount of practice that did not differ statistically from their musician peers (Figure 2). They also reported more frequent practice in childhood than typical musicians (Figure 3). By the cut-off age of 14 for the status of prodigy, prodigies accumulated twice as much practice ($M = 4,563$, range = 702–13,252 h) as early-trained musicians ($M = 2,027$, range = 378–4,004 h).

Group differences in early practice were assessed using permutation analyses. Group attribution was shuffled across participants, and t-tests were calculated at each age. The maximum number of consecutive years that obtained a significant group difference ($p < 0.05$) was logged,

and the process was repeated 1000 times to obtain a null distribution. The observed results (i.e., 9 years of consecutive, significant differences between prodigies and early-trained musicians; 6–14 years old) were less likely than 99.8% of results in the null distribution. A similar permutation test was conducted by comparing prodigies and late-trained musicians across ages with sufficient data (7–18 years of age). The observed result (i.e., group differences from age 7–10 inclusive or four consecutive years), was less likely than 96% of the null distribution (see gray boxes in Figure 3). These results provide further support that prodigies differed in their practice habits in childhood and early adolescence. Visualization of practice between 6 and 14 years old by individual (Figure 4) shows a large variability in the prodigies group, with around half of participants practicing as much as their age-matched peers, and half practicing more.

Since musicians started practicing at different ages, we also analyzed the data by year of musical experience (i.e., years since onset of experience; Figure 5). Using the permutation method outlined above, prodigies were found to accumulate more hours of practice than early-trained musicians from years 3–10 inclusive, thus for eight consecutive years, which corresponds to better performance than 99.5% of the null distribution. In contrast, prodigies did not practice more than late-trained musicians during any year when measured from onset of training.

Almost half of the musicians ($n = 23$ of 54) reported having absolute pitch, with roughly half of that group ($n = 11$) being prodigies. However, the proportion did not differ significantly across groups, with 58% of prodigies ($n = 11$ of 19), 44% of early-trained ($n = 7$ of 16), and 26% of late-trained musicians ($n = 5$ of 19), $\chi^2(2, N = 54) = 3.89, p = 0.143$.

Musical Reward and Motivation

Prodigies did not report finding music more rewarding than musicians or non-musicians. This was tested with an ANOVA computed on the BMRQ global score with group (prodigies, early-trained, late-trained, non-musicians) as a between-subjects factor, $F(3,65) = 1.14$, $p = 0.339$, $\eta^2 = 0.050$. ANOVAs were computed on the scores from each of the three motivation questions (Table 3), with group (prodigies, early-trained, late-trained) as a between-subjects factor. Responses to the motivation questions “I play my instrument. . . Because I would feel guilty if I did not do it” yielded no significant group effect, $F(2,50) = 1.36$, $p = 0.267$, $\eta^2 = 0.051$, and neither did responses to the question “I play my instrument. . . Because it adds something special to my personality”, $F(2,50) = 0.40$, $p = 0.673$, $\eta^2 = 0.016$. However, responses to the question on the source of motivation when beginning to play their instrument showed a significant group effect [$F(2,50) = 4.48$, $p = 0.016$, $\eta^2 = 0.152$; Figure 6]. Post hoc pairwise comparisons using Welch’s t-test (Bonferroni-Holm correction, three pairwise comparisons between groups) showed that prodigies ($M = 2.94$) reported a more external source of motivation when they started to play their instruments compared to late-trained musicians ($M = 1.74$), $t(26.45) = 2.90$, $p = 0.022$.

Global flow during music practice varied across groups (Figure 7), as shown by an ANOVA computed on the global flow score with group (prodigies, early-trained, late-trained) as a between-subjects factor, $F(2,43) = 3.62$, $p = 0.035$. Post hoc group comparisons showed that prodigies reported significantly more flow when they practice their instrument ($M = 3.8$, $SD = 0.5$) compared to early-trained musicians ($M = 3.3$, $SD = 0.5$, $p = 0.039$, Bonferroni-Holm correction used for three pairwise comparisons between groups). Early-trained musicians did not differ significantly from late-trained musicians ($M = 3.7$, $SD = 0.5$, $p = 0.173$).

Personality Traits

There was no indication that prodigies, as a group, possessed more autistic traits than other musicians (Figure 8). The ANOVA computed on the AQ scores with group (prodigies, early-trained, late-trained, non-musicians) as a between-subjects factor and dimension (social, attention switching, attention to detail, communication, and imagination) as a within-subject factor did not reveal an effect of group, $F(3,66) = 1.28, p = 0.289, \eta^2 p = 0.04$. A dimension effect was significant, $F(4,264) = 51.18, p < 0.001, \eta^2 p = 0.44$, but there was no significant interaction with group, $F(12,264) = 1.37, p = 0.179, \eta^2 p = 0.06$. Altogether, participants scored highest on the dimension of attention to detail (Figure 8, right panel). Despite the null result at the group level, there was an indication of higher prevalence of autistic traits among some individual prodigies. The three highest AQ scores (i.e., 29, 33, and 34) belonged to prodigies and one late-trained musician and may indicate clinically significant levels of autistic traits (i.e., the cut-off AQ score is 32; Baron-Cohen et al., 2001). Indeed, the disorder was formally diagnosed in two participants with AQ scores of 29 and 33 (see section “Participants”).

For the Big Five Inventory, an ANOVA was computed on the mean score with group (prodigies, early-trained, late-trained, non-musicians) as a between-subjects factor and dimension or trait (openness to experience, conscientiousness, extraversion, agreeableness, and neuroticism) as a within-subject factor. The traits did not vary significantly by group, $F(3,66) = 1.92, p = 0.135, \eta^2 p = 0.08$, and there was no interaction between group and traits, $F(12,264) = 0.74, p = 0.715, \eta^2 p = 0.03$. However, there was a significant effect of trait, $F(4,264) = 44.66, p < 0.001, \eta^2 p = 0.40$. Overall, participants tended to rate their openness, agreeableness, and conscientiousness high, and their extraversion and neuroticism low (Figure 9).

Intellectual Quotient

Group mean IQ ranged from 113 to 120, which are above average but not exceptionally high considering that 95% of the adult participants had a university education. An ANOVA was computed on global IQ with group (prodigies, early-trained, late-trained, and non-musicians) as a between-subjects factor. There was no significant difference between groups, $F(3,66) = 1.78$, $p = 0.159$, $\eta^2 = 0.075$ (Figure 10), nor between musicians ($M = 116$) and non-musicians ($M = 118$), $t(36.21) = 1.08$, $p = 0.288$.

The IQ battery completed by musician participants included indices of verbal comprehension, perceptual reasoning, auditory-verbal working memory, and processing speed (Figure 11). An ANOVA was computed on the standardized individual index scores ($M = 100$, $SD = 15$, in the general population), with group (prodigies, early-trained, late-trained) as a between-subjects factor and index (verbal comprehension, perceptual reasoning, auditory-verbal working memory, and processing speed) as a within-subject factor. It revealed that verbal comprehension was better than working memory across groups, $F(3,147) = 6.00$, $p < 0.001$, $\eta^2 p = 0.11$. The expected superiority of the prodigies was not significant in any index, as there was no group effect, $F(2,49) = 1.99$, $p = 0.147$, $\eta^2 p = 0.08$, nor interaction between group and index, $F(6,147) = 0.75$, $p = 0.607$, $\eta^2 p = 0.03$.

Visuo-spatial working memory, which was measured in all participants (grand mean = 19.5 of 26 trials, $SD = 2.86$), also did not differ according to group, $F(3,65) = 1.11$, $p = 0.350$, $\eta^2 = 0.049$, as revealed by an ANOVA with group (prodigies, early-trained, late-trained, non-musicians) as a between-subjects factor.

Correlation with early musical practice

Because early intensive practice is one of the factors that differentiated prodigies from the other musicians, we explored whether the individual amount of accumulated hours between age 6 and 14 was related to psychological traits measured here (i.e., 10 correlations; p-values adjusted using Bonferroni-Holm): global IQ, working memory index, processing speed index, openness to experience, conscientiousness, extraversion, music reward (BMRQ total score), autistic traits (AQ total score), attention to detail and flow. Individual amount of early practice varied considerably, especially among prodigies as mentioned previously, varying from 468–12,160 h accumulated between 6 and 14 years old. By comparison, early-trained musicians reported a range of 378–3,536 h and late-trained reported 0–3,623 h. The only trait to correlate significantly with the rate of early practice was extraversion, a dimension from the Big Five Inventory of personality, $r(52) = 0.47$, $p = 0.004$. While it appears at first glance that prodigies drive the correlation (Figure 12), separate correlation tests with only the prodigies ($r(17) = 0.46$, $p = 0.048$ [uncorrected]) or with only the non-prodigies (early-trained and late-trained musicians; $r(33) = 0.35$, $p = 0.040$ [uncorrected]), were significant as well. In other words, extraversion is generally correlated with amount of early practice.

Discussion

The current research examined the lifetime accumulated practice and psychological traits of musical prodigies to identify markers of their exceptionality (as described in the Multifactorial Gene-Environment Interaction Model; MGIM). Prodigies were compared with non-prodigies who began their musical training similarly early (around age 6), or later (around age 10), and non-musicians. Unlike previous studies of prodigies (e.g., Ruthsatz et al., 2014; Ruthsatz and Urbach, 2012; Comeau et al., 2018), our large sample of prodigies did not differ from other musicians in terms of intelligence, working memory, or personality, including autistic traits. Around half of the

prodigies reported having absolute pitch, but the proportion of reported absolute pitch possessors did not vary significantly across groups. The characteristics that set prodigies apart were their report of more frequent practice early in life, a more external motivation to begin playing their instrument, as well as a higher tendency to experience flow during practice. Thus, models such as the MGIM are more appropriate to describe the prodigy phenomenon than the deliberate practice view. Moreover, these results suggest that prodigies are at the high extreme of the continuum of musicality rather than constituting a distinct category of musicians. Prodigies did not differ from the controls on most variables, and when they did differ, as in tendency to experience flow when practicing, their scores overlapped greatly with the ones of the other musicians.

Prodigies reported practicing twice as much as their peers from the age of 6 to 14. However, contrary to what could be expected by the deliberate practice view (Ericsson et al., 1993), there was substantial variability. Some prodigies did not practice more than their peers (Figure 4) and nevertheless reached higher levels of achievement. Our data also indicate that prodigies practice as much as late-trained musicians when measured from the onset of their musical experience. This means that when they begin to play their instrument, prodigies practice as much as children who are around 5 years older than themselves. Different factors could explain this phenomenon. For example, since in general, older children can better sustain their attention (Lin et al., 1999), it could be an indication that prodigies have a more advanced development of sustained attention. We speculate as well that, when they start to play, late-trained musicians must ‘catch-up’ to the other musicians who have already started, especially if they want to pursue a musical career. Musicians who start to play later in life might not have shown early signs of musical aptitude (i.e., predispositions) or a particular interest toward music. Those predispositions to easily learn music

could also explain the fact that some of the prodigies did not practice more than their age-matched peers and still managed to reach exceptional levels of achievement early on.

Obviously, amount of practice is no guarantee of quality, and in fact there was considerable variability of early practice even in prodigies (Figure 4). Musicians' practice on a piece, for example, does not determine the evaluation of a newly learned piece by a jury (Williamon and Valentine, 2000). We propose that rate of progress would be a better index of the quality of practice. In our prior study of prodigies (Comeau et al., 2017), we noted that prodigies learned twice as fast as their peers, judging from the difficulty of musical pieces. For example, after 2.5 years of training, the prodigy Sarah Chang was capable of learning to play the Mendelssohn concerto on the violin whereas the typical pianist would only be capable after 10 years of training (Gagné and McPherson, 2016). Thus, prodigies not only practice more than their peers early on, but they also make more efficient use of their practice time.

Interestingly, prodigies reported that their source of motivation when beginning to play their instrument was more external compared to late-trained musicians, with early-trained musicians not significantly differing from either. Four prodigies but no early or late-trained controls reported the motivation being completely external (i.e., maximal rating). Parental investment might be one of the ingredients for fostering prodigiousness, but the relationship requires further study. For instance, parents may invest more time in response to the unusual behavior of their child. Highly invested parents have been suggested as playing a role in the development of their child's exceptional abilities (Feldman, 1993), but prodigies are also characterized as having an exceptional inner drive to master their work (Winner, 2000). The use of more comprehensive measures of motivation, for example the complete questionnaire from which we selected individual questions

(Desrochers et al., 2006) or interviews with children and parents, could help clarify the sources of motivation in young prodigies and musicians.

Besides parental influences, other factors may account for their distinctive practice behavior. Prodigies were more likely to report flow during musical practice compared to early-trained musicians. Since practice requires high levels of concentration, which is hard to maintain for young children (Lin et al., 1999), any factor that influences the inherent pleasure of the activity could influence motivation to continue. Future research could measure experience of flow directly after a practice session, as well as physiological correlates (Harmat et al., 2015), rather than self-report as used here (Butkovic et al., 2015).

Autistic traits are associated with genetic factors (Miles, 2011), yet autism does not seem to characterize most musical prodigies. Only two of the 19 prodigies met the criteria for clinically significant autistic traits based on their responses to the Autism Spectrum questionnaire (Baron-Cohen et al., 2001) or formal diagnosis. Thus, we found no evidence that autism is a relevant candidate disorder in the search for common genes explaining exceptional achievements. Personality, in contrast, may play a small role. We found that the more a child practiced before adolescence, the more extraverted they reported to be. Extraversion might influence practicing indirectly because it could motivate participation in stage arts (Ullén et al., 2016). However, we note that success in competitions was a selection criterion used here and elsewhere (Ruthsatz and Urbach, 2012) for considering a child as a musical prodigy and musical prodigies were no more extraverted than other participants in our sample.

The early advantage in learning for prodigies appears to be limited to music. We found no evidence of superior intelligence or exceptional working memory in prodigies compared to other musicians, nor did we observe heightened cognitive abilities in musicians compared to non-

musicians. The latter finding is in line with a recent meta-analysis obtaining no evidence for a causal effect of musical training on general cognitive abilities (Sala and Gobet, 2020). Even though most prodigies in our sample (68%) were tested as adults, age of testing does not necessarily undermine the findings. Longitudinal studies show stability of IQ scores from 6 years onward (see Yu et al., 2018; for a review).

In summary, we found that early intense practice characterizes musical prodigies during early childhood, a time when the brain is most plastic (Herholz and Zatorre, 2012). Because pre-existing differences in the recruitment of brain regions involved in auditory encoding and motor control predict success in learning to play an instrument, we may expect prodigies to be born with pre-existing differences in these brain networks. Such predispositions may be amplified by early and sustained practice. Future research should aim to identify the anatomical and functional properties of brain networks that affect exceptional learning rate and achievement. Researchers should also try to recruit prodigies while they are children, in order to better measure the traits and behaviors associated with the prodigy phenomenon as it unfolds.

Data availability statement

The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors, upon reasonable request.

Ethics statement

The studies were reviewed and approved by the Comité d'Éthique de la Recherche en Arts et en Sciences (CÉRAS), University of Montreal, Montreal, Canada. Written informed

consent to participate in this study was provided by the participants or their legal guardian/next of kin.

Author contributions

CM and IP contributed equally in the project's conception. CM, MS, and IP participated in the study design. CM performed the literature search and drafted the manuscript. CM and MW performed the statistical analysis. MW and MS provided the critical revisions. IP performed the final revisions. All authors contributed to the article and approved the submitted version.

Funding

The work is funded by the program of Canada Research Chairs (IP). CM is supported by a fellowship from the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada. MW is supported by the Fonds de Recherche du Quebec – Nature et Technologies.

Acknowledgments

We would like to thank the research assistants who contributed to the data collection: Margot Charignon, Lucie-Maud Ménard, and Kathya Carrier. We give special thanks to our collaborator Jean-François Rivest for lively discussions and referral of talented musicians.

Supplementary material

The Supplementary Material for this article can be found online at:

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2020.566373/full#supplementary-material>

References

- Ackerman, P. L. (2014). Nonsense, common sense, and science of expert performance: talent and individual differences. *Intelligence* 45, 6–17. doi: 10.1016/j.intell.2013.04.009
- Austin, E. J. (2005). Personality correlates of the broader autism phenotype as assessed by the autism spectrum quotient (AQ). *Pers. Individ. Diff.* 38, 451–460. doi: 10.1016/j.paid.2004.04.022
- Baron-Cohen, S., Wheelwright, S., Skinner, R., Martin, J., and Clubley, E. (2001). The autism spectrum quotient: evidence from asperger syndrome/high functioning autism, males and females, scientists and mathematicians. *J. Autism Dev. Disord.* 31, 5–17. doi: 10.1023/A:1005653411471
- Butkovic, A., Ullén, F., and Mosing, M. A. (2015). Personality related traits as predictors of music practice: underlying environmental and genetic influences. *Pers. Individ. Diff.* 74, 133–138. doi: 10.1016/j.paid.2014.10.006
- Campitelli, G., and Gobet, F. (2011). Deliberate practice: necessary but not sufficient. *Curr. Dir. Psychol. Sci.* 20, 280–285. doi: 10.1177/0963721411421922
- Comeau, G., Lu, Y., Swirp, M., and Mielke, S. (2018). Measuring the musical skills of a prodigy: a case study. *Intelligence* 66, 84–97. doi: 10.1016/j.intell.2017.11.008
- Comeau, G., Vuvan, D. T., Picard-Deland, C., and Peretz, I. (2017). Can you tell a prodigy from a professional musician? *Music Percept.* 35, 200–210. doi: 10.1525/MP.2017.35.2.200
- Dalla Bella, S., Sowi, J., Farrugia, N., and Berkowska, M. (2016). “Igor: a case study of a child drummer prodigy igor: a case study of a child drummer prodigy,” in *Musical Prodigies:*

Interpretations from Psychology, Education, Musicology, and Ethnomusicology, ed. G. E. McPherson (Oxford: Oxford University Press), 391–408.

Desrochers, A., Comeau, G., Jardaneh, N., and Green-demers, I. (2006). L'élaboration d'une échelle pour mesurer la motivation chez les jeunes élèves en piano. *Rech. Éduc. Music.* 24, 13–33.

Ericsson, K. A., Krampe, R. T., and Tesch-Römer, C. (1993). The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychol. Rev.* 100, 363–406. doi: 10.1037/0033-295X.100.3.363

Feldman, D. H. (1993). Prodigies: a distinctive form of giftedness. *Gift. Child Q.* 37, 188–193.

Gagné, F., and McPherson, G. E. (2016). “Analyzing musical prodigiousness using Gagné’s integrative model of talent development,” in *Musical Prodigies: Interpretations from Psychology, Education, Musicology, and Ethnomusicology*, Vol. 1, ed. G. E. McPherson (Oxford: Oxford University Press), 3–114. doi: 10.1093/acprof:oso/9780199685851.003.0001

Harmat, L., de Manzano, Ö, Theorell, T., Högman, L., Fischer, H., and Ullén, F. (2015). Physiological correlates of the flow experience during computer game playing. *Int. J. Psychophysiol.* 97, 1–7. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2015.05.001

Herholz, S. C., and Zatorre, R. J. (2012). Musical training as a framework for brain plasticity. *Neuron* 76, 486–502. doi: 10.1016/j.neuron.2012.10.011

Jackson, S. A., and Eklund, R. C. (2004). *The Flow Scales Manual*. Morgantown, WV: Fitness Information Technology Inc.

- John, O. P., Donahue, E. M., and Kentle, R. L. (1991). *The Big Five Inventory— Versions 4A and 54*. Berkeley, CA: University of California.
- Lin, C. C., Hsiao, C. K., and Chen, W. J. (1999). Development of sustained attention assessed using the continuous performance test among children 6–15 years of age. *J. Abnorm. Child Psychol.* 27, 403–412. doi: 10.1023/A:1021932119 311
- Macnamara, B. N., Hambrick, D. Z., and Oswald, F. L. (2014). Deliberate practice and performance in music, games, sports, education, and professions: a meta- analysis. *Psychol. Sci.* 25, 1608–1618. doi: 10.1177/0956797614535810
- Marin, M. M., and Bhattacharya, J. (2013). Getting into the musical zone: trait emotional intelligence and amount of practice predict flow in pianists. *Front. Psychol.* 4:853. doi: 10.3389/fpsyg.2013.00853
- Mas-Herrero, E., Marco-Pallares, J., Lorenzo-Seva, U., Zatorre, R. J., and Rodriguez-Fornells, A. (2013). Individual differences in music reward experiences. *Music Percept.* 31, 118–138. doi: 10.1525/mp.2013.31.2.118
- Meinz, E. J., and Hambrick, D. Z. (2010). Deliberate practice is necessary but not sufficient to explain individual differences in piano sight-reading skill: the role of working memory capacity. *Psychol. Sci.* 21, 914–919. doi: 10.1177/ 0956797610373933
- Miendlarzewska, E. A., and Trost, W. J. (2014). How musical training affects cognitive development: rhythm, reward and other modulating variables. *Front. Neurosci.* 7:279. doi: 10.3389/fnins.2013.00279
- Miles, J. H. (2011). Autism spectrum disorders—a genetics review. *Genet. Med.* 13, 278–294. doi: 10.1097/gim.0b013e3181ff67ba

- Mosing, M. A., Madison, G., Pedersen, N. L., Kuja-halkola, R., and Ullén, F. (2014). Practice does not make perfect: no causal effect of music practice on music ability. *Psychol. Sci.* 25, 1795–1803. doi: 10.1177/0956797614541990
- Nakamura, J., and Csikszentmihalyi, M. (2009). “Flow theory and research,” in *Oxford Handbook of Positive Psychology*, eds C. R. Snyder and S. J. Lopez (Oxford: Oxford University Press), 752.
- Peretz, I., and Vuvan, D. T. (2017). Prevalence of congenital amusia. *Eur. J. Hum. Genet.* 25, 625–630. doi: 10.1038/ejhg.2017.15
- Ruthsatz, J., and Detterman, D. K. (2003). An extraordinary memory: the case study of a musical prodigy. *Intelligence* 31, 509–518. doi: 10.1016/S0160-2896(03) 00050-3
- Ruthsatz, J., and Urbach, J. B. (2012). Child prodigy: a novel cognitive profile places elevated general intelligence, exceptional working memory and attention to detail at the root of prodigiousness. *Intelligence* 40, 419–426. doi: 10.1016/j. intell.2012.06.002
- Ruthsatz, J., Ruthsatz-Stephens, K., and Ruthsatz, K. (2014). The cognitive bases of exceptional abilities in child prodigies by domain: similarities and differences. *Intelligence* 44, 11–14. doi: 10.1016/j.intell.2014.01.010
- Sala, G., and Gobet, F. (2020). Cognitive and academic benefits of music training with children: a multilevel meta-analysis. *Mem. Cogn.* doi: 10.3758/s13421-020- 01060-2
- Schellenberg, E. G., and Weiss, M. W. (2013). “Music and cognitive abilities,” in *The Psychology of Music*, ed. D. Deutsch (Cambridge, MA: Elsevier Academic Press), 499–550. doi: 10.1016/B978-0-12-381460-9.00012-2

- Swaminathan, S., and Schellenberg, E. G. (2019). "Music training and cognitive abilities: associations, causes, and consequences," in *The Oxford Handbook of Music and the Brain*, eds M. H. Thaut and D. A. Hodges (Oxford: Oxford University Press). doi: 10.1093/oxfordhb/9780198804123.013.26
- Ullén, F., Hambrick, D. Z., and Mosing, M. A. (2016). Rethinking expertise: a multifactorial gene–environment interaction model of expert performance. *Psychol. Bull.* 142, 427–446. doi: 10.1037/bul0000033
- Ullén, F., Mosing, M. A., and Madison, G. (2015). Associations between motor timing, music practice, and intelligence studied in a large sample of twins. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1337, 125–129. doi: 10.1111/nyas.12630
- Wakabayashi, A., Baron-Cohen, S., and Wheelwright, S. (2006). Are autistic traits an independent personality dimension? a study of the autism-spectrum quotient (AQ) and the NEO-PI-R. *Pers. Individ. Diff.* 41, 873–883. doi: 10.1016/j.paid.2006.04.003
- Wallentin, M., Nielsen, A. H., Friis-Olivarius, M., Vuust, C., and Vuust, P. (2010). The musical ear test, a new reliable test for measuring musical competence. *Learn. Individ. Diff.* 20, 188–196. doi: 10.1016/j.lindif.2010.02.004
- Wechsler, D. (1999). *Manual for the Wechsler Abbreviated Intelligence Scale (WASI)*. San Antonio, TX: The Psychological Corporation.
- Wechsler, D. (2001). *Echelle Clinique de Memoire de Weschler MEM III (WMS-III)*. Paris: Les Editions Du Centre de Psychologie Appliquee.
- Wechsler, D. (2003). *Wechsler Intelligence Scale for Children-(WISC-IV) Technical and Interpretive Manual, 4th Edn.* San Antonio, TX: Psychological Corporation.

Wechsler, D. (2008). Wechsler Adult Intelligence Scale (WAIS–IV), 4th Edn, Vol. 22. San Antonio, TX: NCS Pearson, 498.

Williamson, A., and Valentine, E. (2000). Quantity and quality of musical practice as predictors of performance quality. *Br. J. Psychol.* 91, 353–376. doi: 10.1348/000712600161871

Winner, E. (2000). The origins and ends of giftedness. *Am. Psychol.* 55, 159–169. doi: 10.1037//0003-066X.55.1.159

Yu, H., BetsyMcCoach, D., Gottfried, A. W., and Gottfried, A. E. (2018). Stability of intelligence from Infancy through adolescence: an autoregressive latent variable model. *Intelligence* 69, 8–15. doi: 10.1016/j.intell.2018.03.011

Tables

Table 1. Demographics.

Group	Prodigies	Early-trained	Late-trained	Nonmusicians	Statistics
N	19	16	19	16	-
Sex (F=female; M=male)	7 F, 12 M	7 F, 9 M	7 F, 12 M	9 F, 7 M	$\chi^2(3, N = 70) = 1.74, p = .628$
Age (years)	21.3 ± 7.4 (12-34)	23.3 ± 6.2 (14-33)	25.2 ± 7.0 (14-37)	24.4 ± 6.9 (14-36)	$F(3, 66) = 1.10, p = .356$
Education (years)	14.0 ± 5.0 (6-21)	15.4 ± 4.0 (8-21)	16.8 ± 4.3 (8-25)	16.9 ± 3.9 (9-25)	$F(3, 66) = 1.82, p = .153$

Values are reported in mean ± standard deviation with range in parentheses.

Table 2. Musical experience.

Group	Prodigies	Early-trained	Late-trained	Statistics
N	19	16	19	---
Age of onset (years)¹	4.9 ± 1.3 (3-8)	5.5 ± 1.5 (4-9)	10.3 ± 2.5 (7-15)	$F(2, 51) = 46.59,$ $p < .001$
Musical experience (years)¹	17.2 ± 7.6 (8-31)	18.1 ± 6.4 (9-28)	15.2 ± 6.5 (7-28)	$F(2, 51) = 0.84,$ $p = .438$
Lifetime practice (hours)¹	12,710 (836-35,788)	11,576 (628-34,192)	11,005 (732-50,372)	$F(2, 51) = 0.13,$ $p = .876$

Values are reported for mean ± standard deviation, range is provided in parentheses.

Table 3. Selected items to measure motivation.

Item	Response scale		
I play my instrument...			
<i>Because I would feel guilty if I did not do it</i>	Totally disagree	1 2 3 4 5	Totally agree
<i>Because it adds something special to my personality</i>	Totally disagree	1 2 3 4 5	Totally agree
<i>What was the source of motivation when you began to play your instrument?</i>	Completely internal	1 2 3 4 5	Completely external

Figures

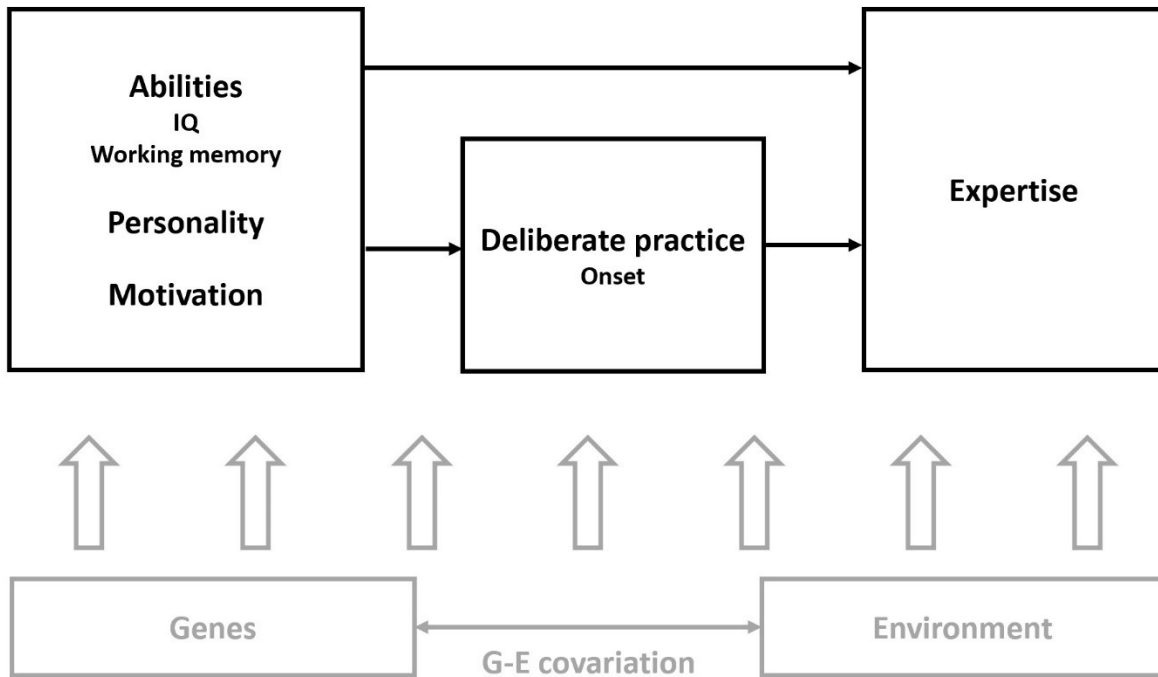


Figure 1. Adaptation from the Multifactorial Gene–Environment Interaction Model proposed by Ullén et al. (2016) in which the factors assessed here are highlighted in black. The arrows represent the influence between psychological traits, practice behavior, and expertise (or achievement). Below are the complex influences of genes, environment, and their interaction on all the variables depicted above.

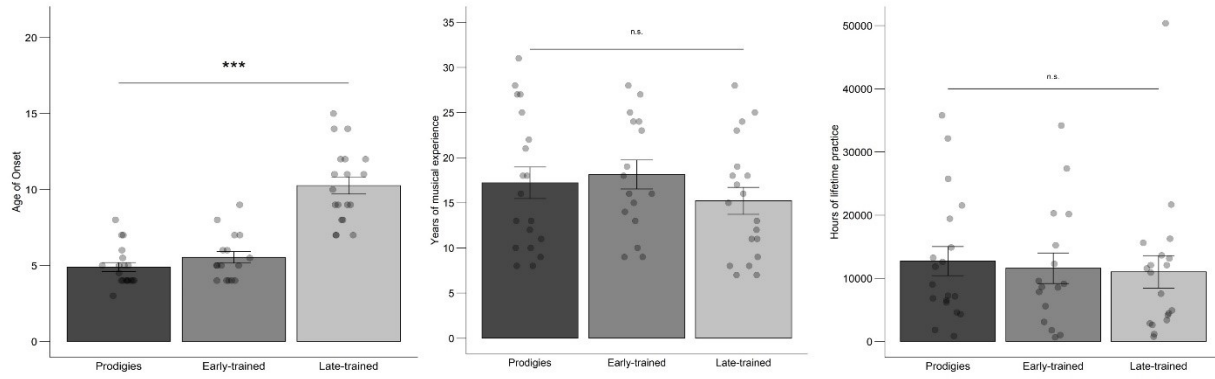


Figure 2. Musical experience measures: mean, standard error and individual data by group. Points are jittered horizontally for visualization purposes.

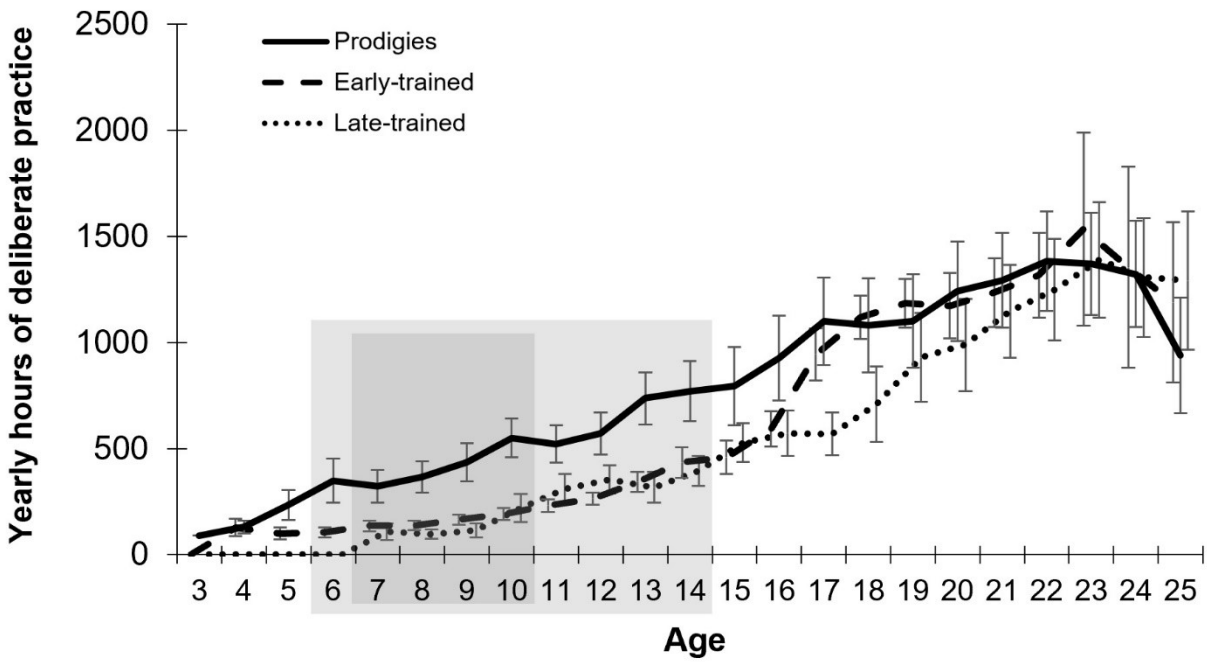


Figure 3. Mean yearly amount and standard error of deliberate practice as a function of age, by group. Gray areas represent the longest stretches where permutation analysis showed a significant difference between prodigies and early-trained musicians (larger rectangle) and between prodigies and late-trained (smaller rectangle).

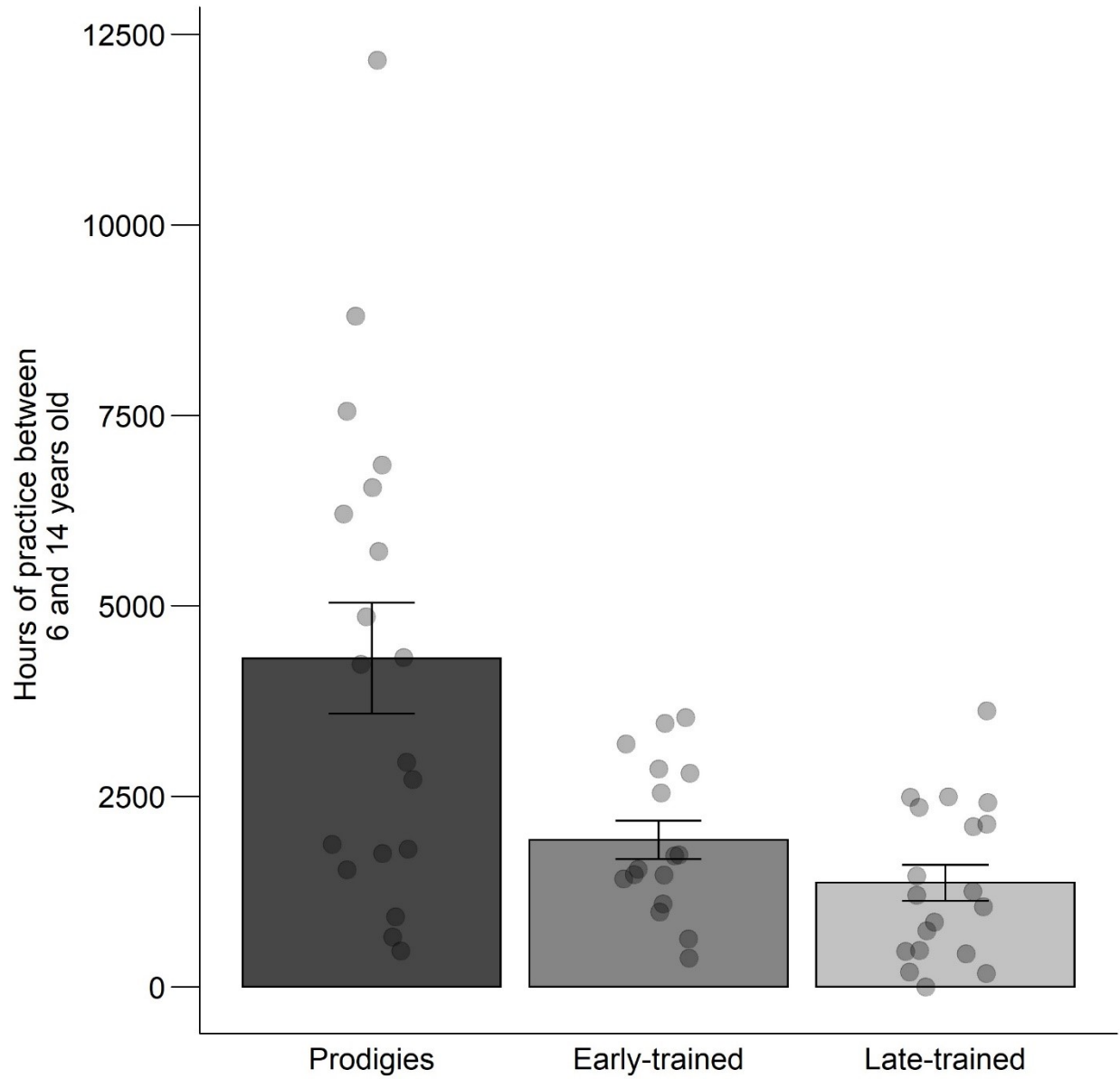


Figure 4. Deliberate practice accumulated between 6 and 14 years old: mean, standard error and individual data, by group. Points are jittered horizontally for visualization purposes.

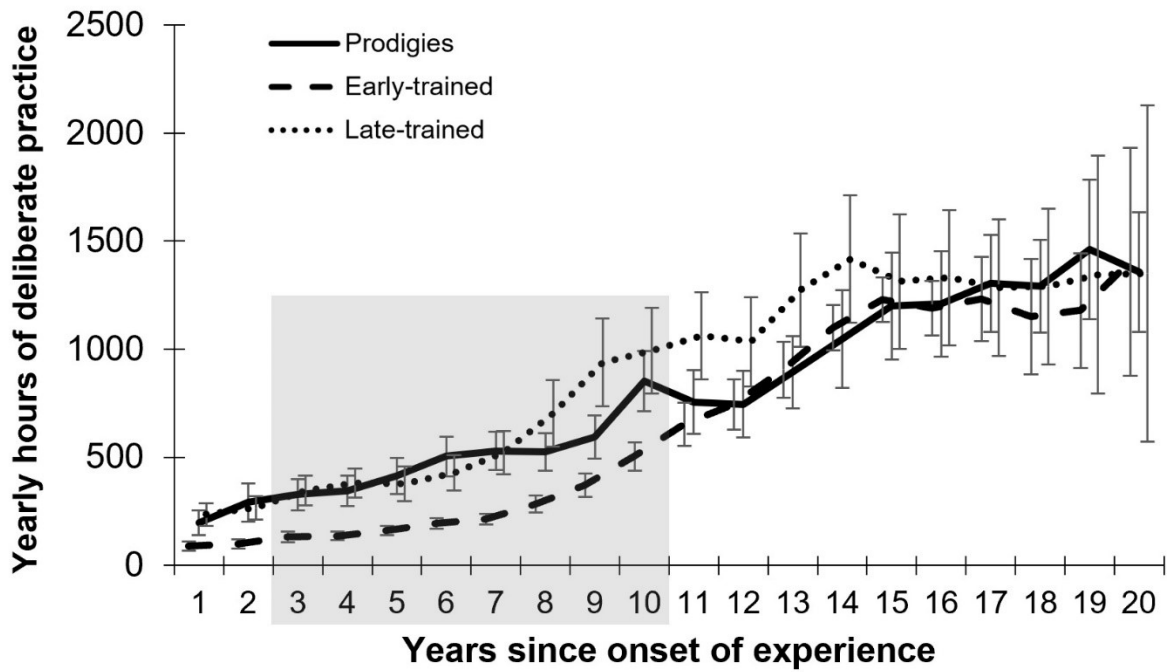


Figure 5. Mean yearly amount of practice and standard error as a function of year since onset of musical experience, by group. The gray area represents the longest stretch where permutation analysis showed a significant difference between prodigies and early-trained musicians.

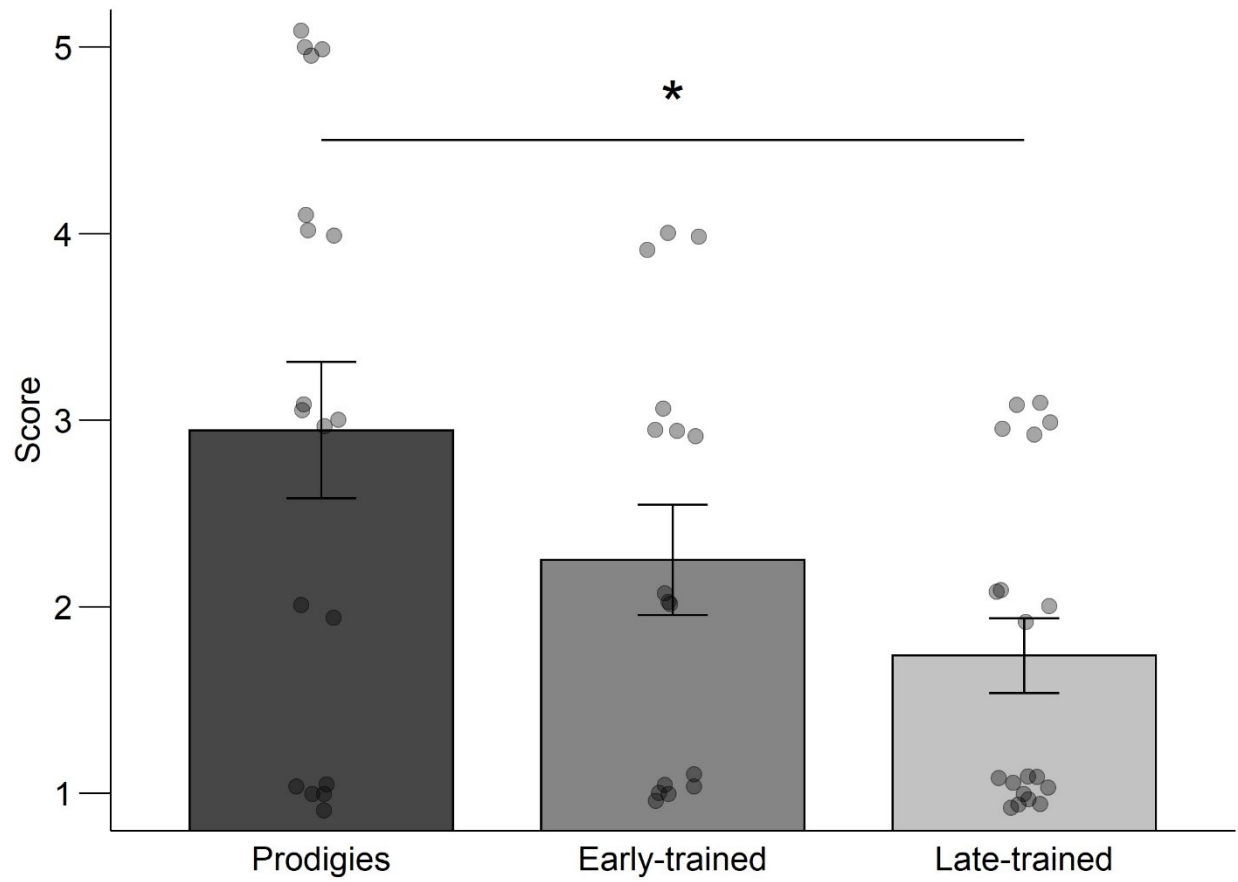


Figure 6. Source of motivation when beginning to play: mean rating score, standard error and individual data, by group. Points are jittered for visualization purposes. See also row three of Table 3.

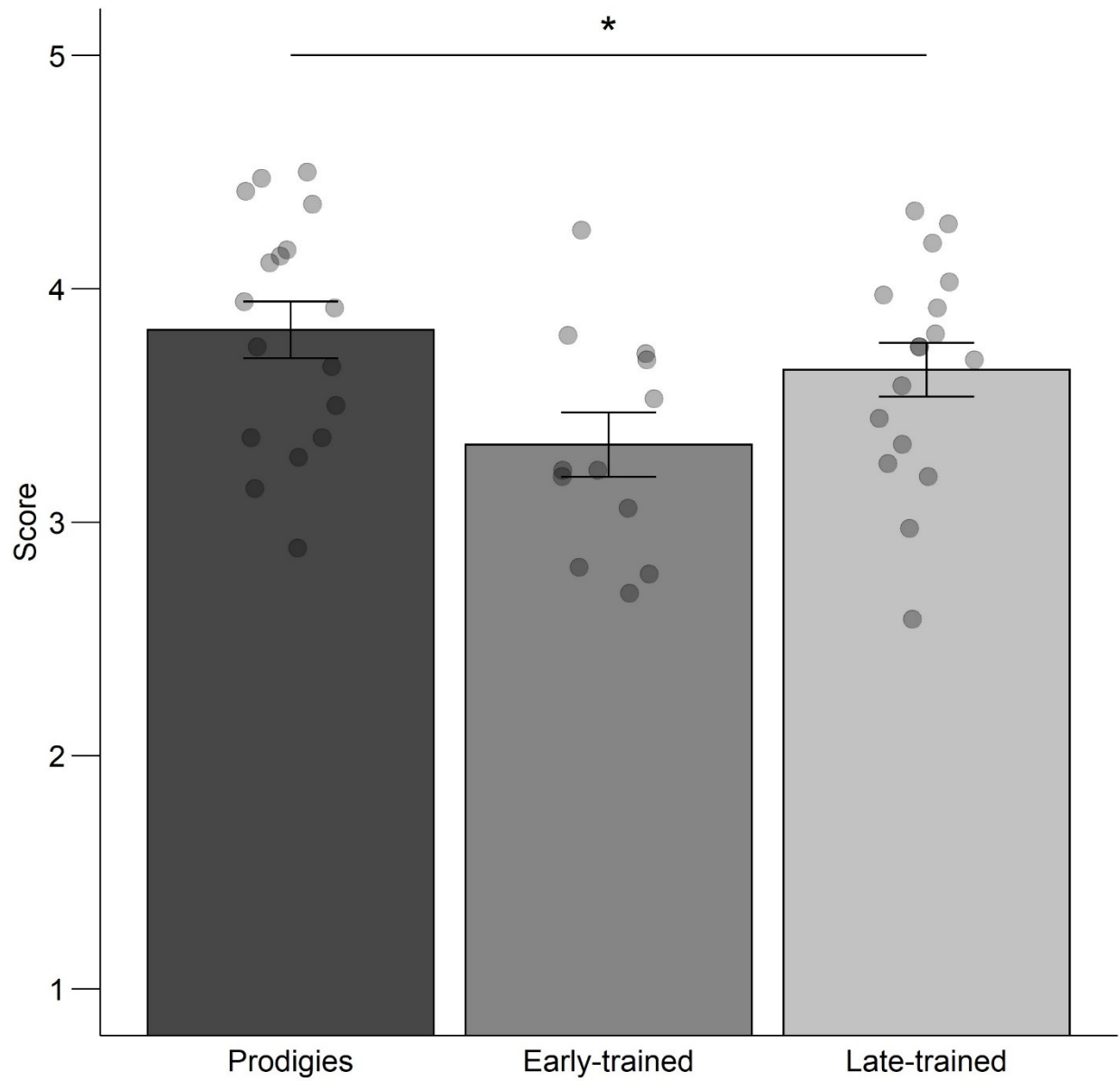


Figure 7. Global flow: mean score, standard error and individual data, by group. Points are jittered horizontally for visualization purposes.

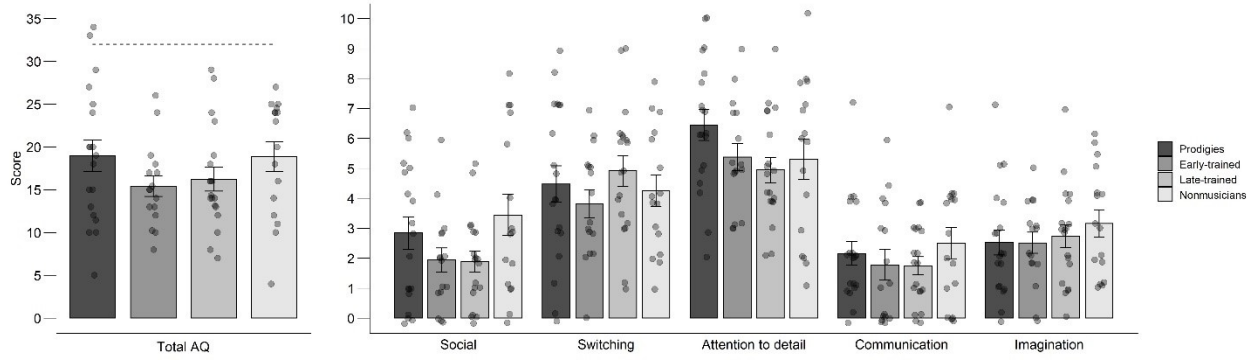


Figure 8. Autism Spectrum Quotient (AQ) scores. In the left panel, mean scores, standard error and individual data for the total AQ score, by group. The dashed line indicates the cut-off score for clinically significant levels of autistic traits; In the right panel, mean scores, standard error and individual data by dimension and group. Points are jittered for visualization purposes.

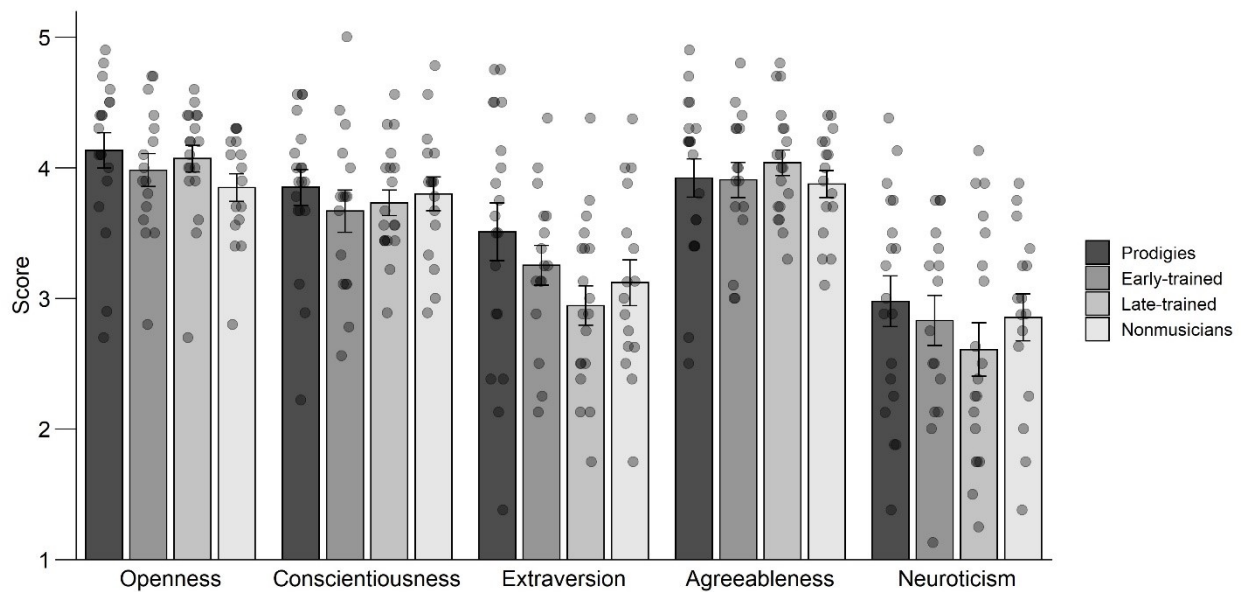


Figure 9. Big Five Inventory: mean scores, standard error and individual data, by trait and group. Points are jittered horizontally for visualization purposes.

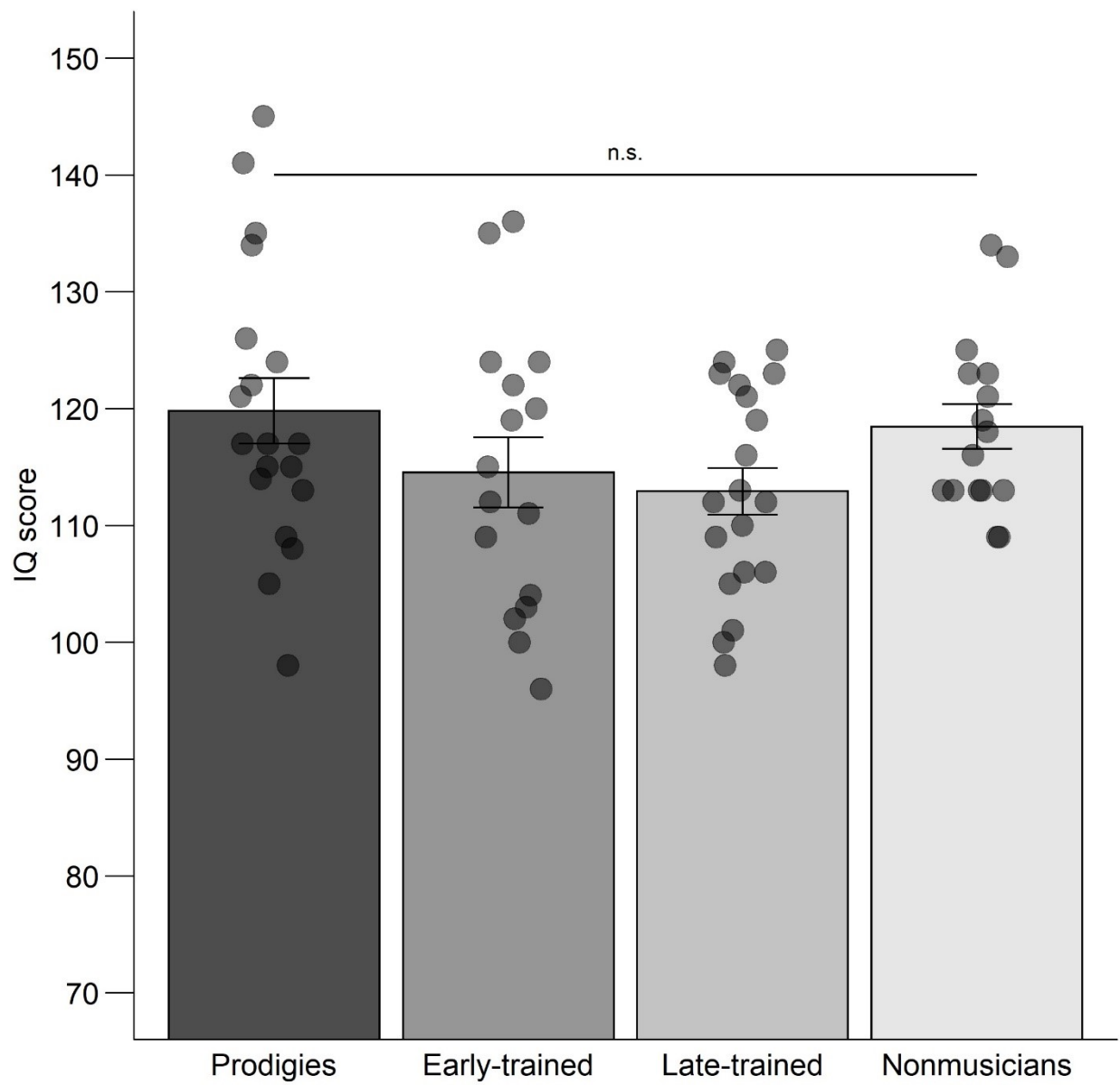


Figure 10. Global IQ: mean scores, standard error and individual data, by group. Note that the mean score in the general population is 100 and one standard deviation is 15 points. Points are jittered horizontally for visualization purposes.

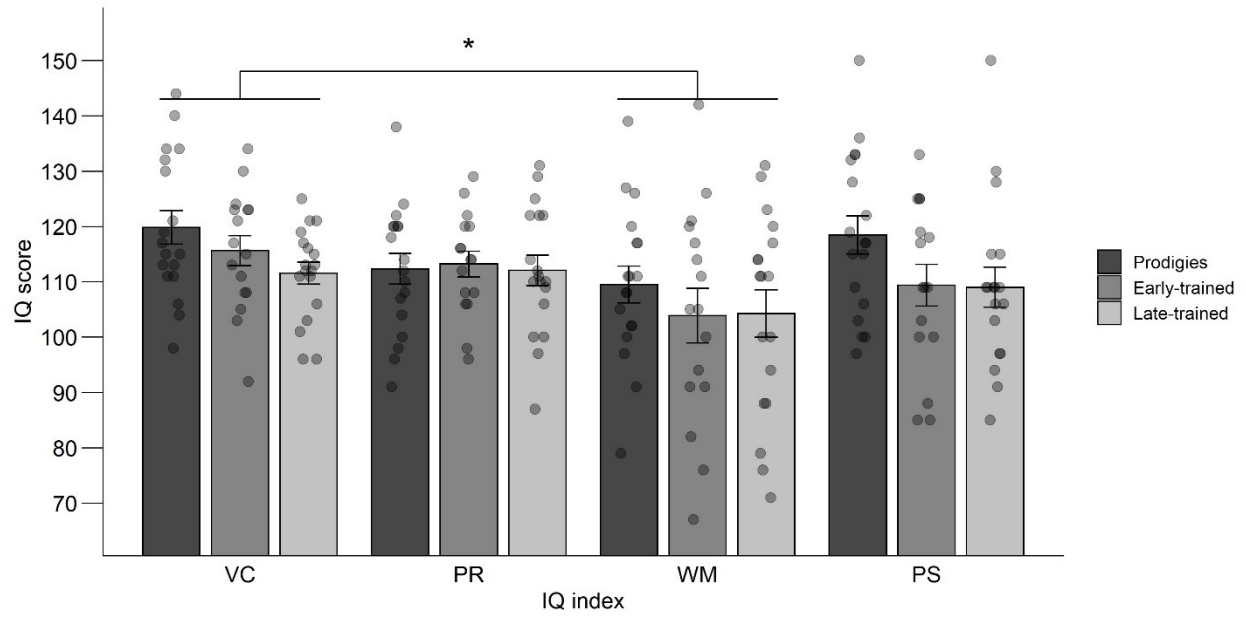


Figure 11. Mean IQ scores, standard error and individual data for verbal comprehension (VC), perceptual reasoning (PR), working memory (WM), and processing speed (PS), by group. Points are jittered horizontally for visualization purposes.

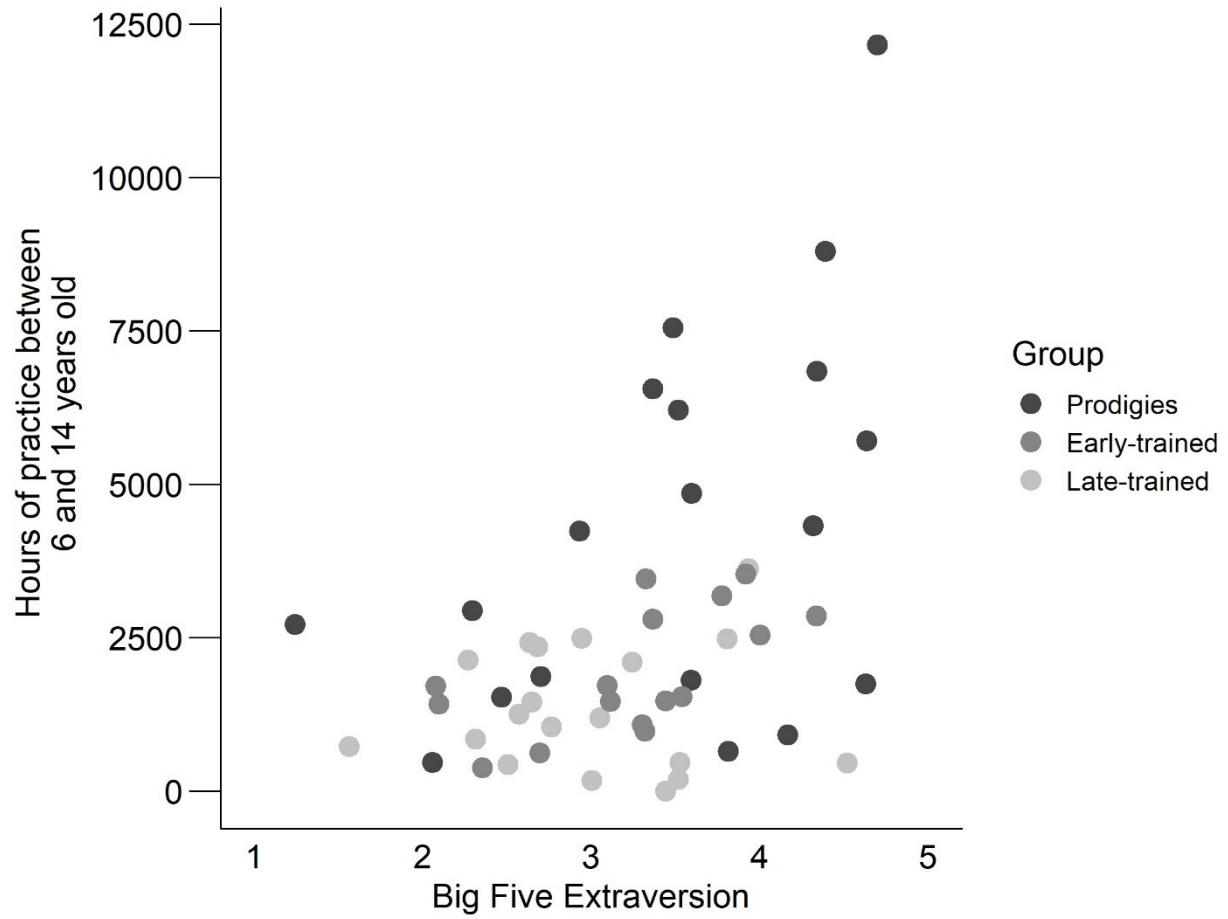


Figure 12. Deliberate practice accumulated between 6 and 14 years old in relation to extraversion as measured by the Big Five Inventory, by group.

Conflict of Interest: The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Copyright © 2020 Marion-St-Onge, Weiss, Sharda and Peretz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CCBY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) and the copyright owner(s) are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

Article 2 : Exceptional memory in a guitar virtuoso: A single case-control study

Chanel Marion-St-Onge¹, Isabelle Héroux², Michael W. Weiss¹, Dawn Merrett¹, Margot Charignon¹, and Isabelle Peretz¹

¹. Department of Psychology, Université de Montréal, Montréal, QC, Canada, International Laboratory for Brain, Music and Sound Research (BRAMS), Outremont, QC, Canada.

². Department of Music, Université du Québec À Montréal.

Article en préparation

Highlights

We document the exceptional learning rate of a musical piece by a virtuoso, TB.

TB's musical abilities were among the highest compared to trained musicians.

TB's memory was superior across modalities.

This case corroborates multifactorial models of expertise.

Abstract

Introduction

A guitar virtuoso (TB) who self-reported superior memorization skills was studied in a single case-control design. This study aimed to objectively assess memory for musical and nonmusical stimuli, and explore the factors that might underlie superior ability and early musical achievement (i.e., prodigiousness).

Method

In the primary task, TB and 4 matched instrumentalists (guitar) were instructed to learn a challenging, unfamiliar piece in a limited amount of time (22.5 min) and immediately perform it from memory. The learning session was filmed and analyzed for strategy use. The performance was analyzed for the number of notes correctly recalled (objective) and musicality (subjective, expert assessment). In a set of secondary tasks, TB and a larger sample of 16 musicians matched in musical experience completed tests of musical learning and perception, as well as standardized tasks of verbal learning, general cognitive abilities (IQ, working memory), and experience of flow during practice. Brain structure and function were also analysed using MRI imaging.

Results

TB correctly recalled significantly more notes in the primary task, at least 1.5 of the other musicians, and his rendition was assessed as being the most musical. TB used more memorization strategies during rehearsal and seemed to use them more efficiently. In the secondary musical tasks, TB was among the highest performers in measures of melodic perception and learning. TB also showed similar IQ but superior memory in both auditory-verbal and visual-spatial domains compared to trained musicians or standardized scores of the general population.

Discussion

Memorization of a novel guitar piece was exceptional and consistent with self-reports and real-life achievements. Idiosyncratic cases like these are better accounted for by multifactorial models of expertise. TB's exceptional memorization might have emerged not only from superior memory and musical ability, but also from (and not limited to) extensive practice, the efficient use of relevant strategies, motivation, flow, a neurodevelopmental condition, brain structure and function, and their interaction during development.

Keywords: Memory; Expertise; Music cognition; Tourette Syndrome; Prodigy

1 Introduction

1.1 The case

TB is a critically-acclaimed guitar virtuoso. His first instruments were piano (age 4) and violin (age 9). He played violin only for a total of one year and a half, but progressed rapidly and played with sufficient skill to be featured on television, and meets the criteria used previously (Marion-St-Onge et al., 2020) to be considered an early achieving musician (or prodigy). After beginning to play classical guitar at age 12, he became an exceptional guitarist as well. As of this writing, TB has won over a dozen first prizes in national and international competitions and numerous second or third prizes in international competitions as a classical guitarist.

TB was diagnosed with a Gilles de la Tourette Syndrome at around age 11. This syndrome is characterised by sudden, non-rhythmic and recurrent movements (American Psychiatric Association, 2013). In TB, tics have reduced in frequency since childhood, but still manifest and are inhibited during musical practice and performance.

TB reports being a very quick learner, claiming, for example, the ability to learn difficult new pieces in a matter of days instead of weeks in more typical musicians. The goal of the present study is to objectively assess this learning advantage and to illuminate the factors driving it.

1.2 Exceptional memory and learning

Memory plays an important role in musicians who often have to memorize musical pieces for public performance (Lisboa, Demos, & Chaffin, 2018), or for music competitions as those TB engages in. These memory feats raise the question of innate or acquired origin. For example, Mozart's transcription of the whole Miserere was done after one or two hearings (Kopiez & Lehmann, 2016). One explanation could be that Mozart has an unusual and naturally vivid memory that allowed this unprecedented feat (Sloboda et al., 1985). But Sloboda (1985) suggested that

Mozart's exceptional accomplishment might as well be the result of the use of chunking, pattern identification, and musical knowledge. There is an extensive literature on expert memory, notably in the field of chess, which uncovered the role of domain-related experience and knowledge (Lane and Chang, 2018) on experts' memory abilities (Gobet, 1998). Chess masters can recall a chess board better than novices after viewing it for a few seconds, but not when positions are random (Chase and Simon, 1973). Their advantage, in other words, is linked to greater experience in chess rather than general memory (Chase and Simon, 1973).

Individual practice is an important element in acquiring musical expertise (Ericsson et al., 1993; Sloboda et al., 1996). Practice explains non-negligible amounts of variance in music performance (23%; Macnamara et al., 2014). While the relative importance of practice to explain inter-individual differences in expertise is debated, the fact that practice is important for individual progress in knowledge and skill in a specific field is not (Hambrick et al., 2020). Moreover, musical training has been positively associated with general cognitive abilities and musical ability (see Swaminathan and Schellenberg (2019) for a review). In the current study, TB will be compared with highly experienced musicians.

Besides practice quantity, the choice of strategies when practicing a new musical piece are relevant for good memorization (Duke et al., 2009) and performance quality (Williamon and Valentine, 2000). For example, during their learning process, musicians break down the piece and practice sections separately before putting them back together (Chaffin & Logan, 2006; Chaffin, Lisboa, Logan, & Begosh, 2010). They emphasize on different aspects as the learning progresses (Chaffin & Logan, 2006). In a self-paced task requiring advanced pianists to learn a piano excerpt from memory, total time spent practicing was unrelated to the ability to play the excerpt correctly from memory, and what differentiated the top-ranked pianists was the use of specific strategies,

especially related to error location and correction (Duke et al., 2009). The strategies used during the rehearsal of a novel guitar piece will be explored in the current study.

Prodigies whose musical abilities have been investigated showed some abilities that stood out from their peers', and other abilities that appear to be in the normal range. For example, melodic perception was elevated in the two prodigies who have been tested for this ability (Comeau et al., 2018; Ruthsatz and Detterman, 2003), and rhythm perception was either normal (Dalla Bella et al., 2016) or higher than average (Ruthsatz & Detterman, 2003). Musical abilities will be measured here.

Good memory for musical content could contribute to the ability to memorize new pieces. In special populations with superior memory in a specific domain, like musical savants, people with HSAM, or super-recognizers, memory feats are often specific to their field of expertise or interest (Feldman and Morelock, 2020), but some show heightened memory abilities across different modalities (Jenkins et al., 2021). For example, in (Sloboda, Hermelin, & O'Connor, 1985), a musical savant (NP) could recall almost all the notes from a 64-bar piece presented only a few times, while a control musician could only recall 8 bars. When tested with a simpler and shorter but atonal piece, NP's skills did not surpass those of the control musician. NP's memory abilities did not extend to verbal content either, and he showed severely impaired verbal and non-verbal IQs (Sloboda et al., 1985). Individuals with HSAM excel at remembering verifiable events that happened in their past (LePort et al., 2012). Many can identify the day of the week of any date that occurred since their mid-childhood, at a mean rate of 97% of correct responses (LePort et al., 2012). Their exceptional autobiographical memory would not be explained by generally higher cognitive abilities (LePort, Stark, McGaugh, & Stark, 2017). Super-face-recognisers, i.e., people at the high end of the continuum of face recognition abilities (Young & Noyes, 2019) might show some transfer of ability across modalities, as they also tend to show superior voice recognition

abilities (Jenkins et al., 2021). For the purpose of this study, memory for new non-guitar melodies will be assessed. For comparison with memory for non-musical content, a task of word learning will also be used.

TB's exceptional memorisation abilities of novel guitar pieces, if confirmed, could potentially rely on non-musical working memory. Some (Ruthsatz et al., 2014; Comeau et al., 2018) but not all (Marion-St-Onge, Weiss, Sharda, & Peretz, 2020) studies on early achieving musicians have evidenced exceptional performance on working memory tasks. Visual working memory has also been linked to sight-reading skills independently from practice (Meinz and Hambrick, 2010). Sight-reading is a key component when learning a new piece using sheet music, particularly in the guitar piece learning task used in this study. We will assess auditory-verbal and visual-spatial working memory.

General cognitive abilities are of interest as well, as they predict the ability to learn a piano piece in beginners above musical aptitude (Burgoyne, Harris, & Hambrick, 2019). On standardised tests of cognitive abilities, early achieving musicians tend to have above average global IQ, but not necessarily at the high end of the spectrum (Ruthsatz et al., 2014) and not higher than musicians matched on musical experience (Marion-St-Onge et al., 2020). In this study, we included a measure of global IQ.

Learning music pieces requires practice, and musical practice is an activity that satisfies the conditions for inducing flow experience (de Manzano, Theorell, Harmat, & Ullén, 2010). Flow has been associated positively with musical practice (Butkovic et al., 2015; Marin and Bhattacharya, 2013). Practice is a demanding and effortful task that has been described as not inherently enjoyable (Ericsson et al., 1993). But when in a state of flow, one can experience among other elements intense concentration and enjoyment (Nakamura and Csikszentmihalyi, 2012). Musicians who were early achievers report more flow during music practice compared to musicians matched on

onset of musical training (Marion-St-Onge et al., 2020). However, Marin and Bhattacharya (2013) found no evidence of a relationship between flow and winning a prize at a piano competition. When a task's difficulty matches one's skills, flow (absorption in the task more specifically) and mental effort are the greatest (Harris, Vine, & Wilson, 2017). Heightened flow could suggest an optimal effort during practice. Subjective flow during musical practice should be measured.

Although brain structure and function in early achieving musicians, or prodigies, has not yet been investigated, a large body of evidence shows that music training, particularly when started early in life, can lead to wide-spread changes in brain structure and function (Herholz & Zatorre, 2012; Merrett, Peretz, & Wilson, 2013). Predispositions in brain structure and function that significantly influence music learning have also been reported (Herholz, Coffey, Pantev, & Zatorre, 2015; Olszewska, Gaca, Herman, Jednoróg, & Marchewka, 2021) and may be particularly relevant for early achievers. In this case, in addition to potential predispositions and neuroplastic changes related to musicianship, TB also has Tourette Syndrome, a condition that is known to have a large impact on the brain. Interestingly, some of the brain regions that are often affected in Tourette Syndrome, such as sensorimotor cortex, prefrontal cortex, cerebellum, and subcortical structures such as the caudate and hippocampus (Draganski et al., 2010; Peterson et al., 2007), are some of the same regions involved in music training-induced neuroplasticity and predispositions for music learning. Thus, the potential interaction between these factors in TB's brain structure and function should be explored.

1.3 Research question and goals

The goals of the current research are (1) to assess objectively the self-report of exceptional musical learning in a guitar virtuoso, TB, compared to highly trained musicians, and (2) to examine the factors that could be related to early musical achievement and exceptional musical memory.

To answer this question, we aim to objectively assess TB's self-reported exceptional memory for a novel guitar piece, and to explore possible underlying mechanisms for this learning advantage, such as the use of specific practice strategies during guitar rehearsal, musical perception, memory for new melodies, memory for words, auditory-verbal and visual-spatial working memory, IQ, flow, and brain structure and function.

2 Methods and results

2.1 Participants

2.1.1 Case history. The participant, TB, is a 32 years old male guitarist whose first language is French. He is the only child of two musician parents. Both parents earned a university degree in music, but neither in guitar. The timeline of TB's musical experience is detailed in Figure 1. TB showed a rapid pace of learning a musical instrument early in life. TB was invited to play violin on a TV show only one year after beginning to play. He reports being able to learn multiple violin pieces every week at that time and to have progressed rapidly through the curriculum (Schott violin method). TB stopped playing violin completely that same year and started to play guitar two years later, which remains his primary instrument. TB completed a bachelor degree and a master's degree in guitar interpretation. TB has won more than a dozen national and international competitions as a classical guitarist.

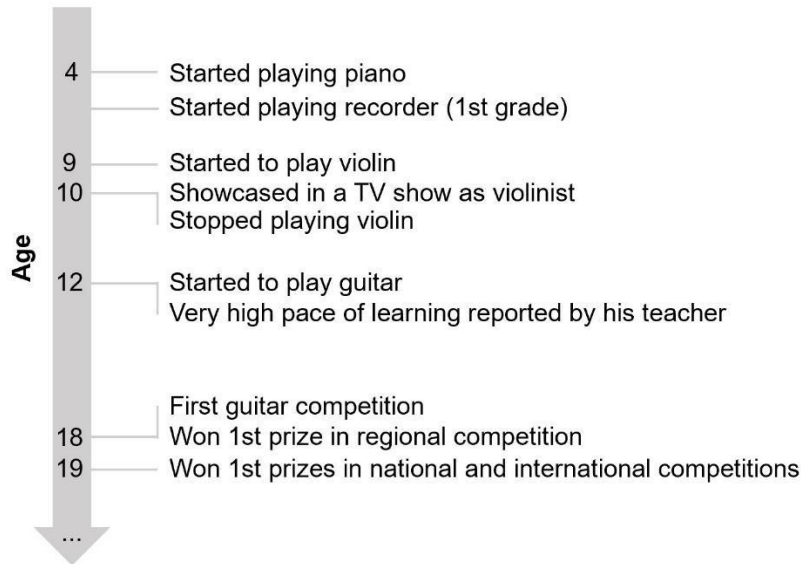


Figure 1. TB's musical experience by age

TB's first guitar teacher confirmed that TB learned new pieces rapidly, both in terms of motor and memory ability, and that he had incredible talent. According to this teacher, TB was successful in learning new pieces, and practiced more than the other students. The teacher attributed this elevated practice to parental support as well as a very high motivation.

In terms of practice habits, TB reports a tendency to be very absorbed when performing and practicing, and reports being able to practice for up to 6 hours in a row without feeling time passing. TB now tries to manage practice time in order to prevent injuries. TB reports not to be disturbed by external distractions (e.g., did not notice multiple trains passing during a concert performance). He also reports not to play "for fun", but rather, always with the goal of learning and working, for example preparing for competitions.

TB suffered from different medical conditions. At 10 years old, Tourette spasms began with the first spasms involving face muscles (eye blinks, eye movements, eyebrows lift). The spasms evolved and reached their peak at around 11 years old, the age around which TB received a formal

diagnosis. Afterwards, the tics reduced progressively in frequency with specific training. At the moment of testing, TB's spasms were relatively well controlled, especially when playing music, in social contexts or when receiving attention (e.g. interview on television), while driving, and when concentrated in general.

From 6 to 13 years old, TB reports taking psychostimulant medication to attenuate hyperactive behavior. However, TB never received a formal diagnosis of ADHD.

TB also reports absence seizures as a child. These occurred between ages 8 to 10, occurred regularly, and were treated with medication. In general, the impact of epilepsy on cognition depends on many different factors like the etiology, region affected, frequency of seizures, comorbidities, medication, among others (Holmes, 2015). It is impossible to know how those seizures could have affected TB's cognition. As in Tourette syndrome, epilepsy is a possible source of cognitive impairment rather than improvement. Thus, if we find evidence of exceptional cognitive abilities or learning capacity in TB, these would be present *despite* these conditions.

2.1.2 Control participants. TB as well as 16 musician controls participated in this study (see Table 1 for demographics and musical experience). The control participants were musicians fluent in French and selected to have high levels of musical experience, at least 10,000 hours of practice as estimated during a semi-structured interview from daily amounts of practice throughout their lifetime. Given the conceptual caveats of the term "deliberate practice" (Hambrick et al., 2020), we will use the term "practice" to describe practice alone on the instrument (i.e., not for leisure nor in group). None of the controls have received national or international recognition of their talent before 18 years old, for example through media appearances or competitions.

Participants in this study constitute a subsample of the participants included in a previously published paper (Marion-St-Onge et al., 2020).

Table 1.*Demographics and musical experience of TB and the musician controls*

Variable	TB	Controls
N	1	16
Gender	M	2 F, 14 M
Age	32	29.8 ± 4.2
Education (years)	18	19.4 ± 2.0
Years of musical experience	28	21.4 ± 4.8
Hours of deliberate practice	21 528	19 170 ± 10 499

Among the 16 controls, four were male guitarists. They were selected to match TB in gender and as close as possible in age (27-35 years old), as well as the age of onset of guitar playing and the number of years of guitar experience (see Table 2). None of the guitarists reported having absolute pitch. These participants performed two tasks in addition to those performed by other controls: the main learning task (guitar piece) as well as a verbal learning test (CVLT-II).

Table 2.*Detailed musical experience of TB and the guitarist controls*

ID	Age of onset (music)	Age of onset (guitar)	Years of guitar lessons	Years of guitar playing	Hours of deliberate practice
TB	4	12	12	17	21 528
G1	10	10	20	20	13 636
G2	14	14	10	13	12 068
G3	11	11	17	24	15 600
G4	6,5	11	16	23	50 372

2.2 Statistical analysis

Results from many of the behavioral tasks used here have been analysed using the updated method from Crawford, Garthwaite and Porter (2010) for comparing a single case to a control group (J. R. Crawford & Garthwaite, 2002; J. R. Crawford & Howell, 1998; John R. Crawford, Garthwaite, & Porter, 2010). The software *Singlims_ES.exe: Significance test and point & interval estimates of effect size and abnormality for a patient's score* (Crawford et al., 2010) was used to perform a two-tailed significance analysis (with the estimated t -value), as well as calculation of effect size (z_{cc}) and confidence limits. This method has been described as a robust statistical method, and the gold standard when comparing a single case to a small control sample (e.g. Ferreira-Correia et al., 2020; Scandola and Romano, 2021).

2.3 Guitar piece learning task

The selected piece is the first movement of the *Suite d'été* by the French composer Georges Delerue (1925-1992), published by Gedel music in 1992. The 73 bars of the *I. Recitativo* are composed in a modern style with lyrical writing. This almost unknown work is made of accompanied monodic lines, some polyphonic passages and chord progressions presenting medium technical challenges in a slow tempo. This piece was unknown by all participants who executed this task. This piece would normally take one or two weeks to fully master in order to play it in concert.

The guitarists brought their own guitar in order to perform the task. The task took place in an audio booth or in a closed quiet room which minimised distractions from external stimuli. First, participants were allowed time to warm up on their instrument. Then, they received the score. The experimenter announced they would have the score for around twenty minutes, and that at the end of this practice time, the score would be removed from them, and they would have to play it from memory as much as they could. They were allowed 22.5 minutes to practice freely and alone before

they were asked to perform it from memory in front of the experimenter. The amount of time allowed to practice was aimed to be around 20, but the first participant to perform the task had exactly 22.5 minutes for reasons unrelated to the task or the participant and this amount was kept consistent for subsequent participants. This practice session length has been proved to be enough to allow significant improvement (Miksza, 2011). TB performed the piece from memory in front of 4 experimenters, and the other guitarists performed in front of one. The practice time and performance were video-recorded.

2.3.1 Number of notes learned. For each bar of the piece’s total of 73 bars, the number of correct notes, as well as added, missed and incorrect notes were calculated. Manual scoring was first done independently by two of the co-authors, which led to very similar global results (between 0.3% and 3.5% of discrepancy for the percentage of correct notes played). The scorers then joined and revised the results to obtain one set of final scores for each bar played by each participant. The software Melodyne (Celemony, Inc.) was used to generate audiovisual aids.

One participant’s data (G4) was mostly improvised and the number of notes learned could not be analyzed properly; thus we removed this participant from the guitar piece learning task results.

The task was challenging to all participants. Only one participant (TB) performed more than half of the piece correctly, and no one performed more than two-thirds of the piece correctly. More importantly, TB greatly outperformed the other experienced guitarists, scoring more than 25% of total correct notes higher than the second-best mark (see Table 3).

Table 3.

Guitar learning task results

ID	Total correct notes /351	Percent correct (%)	Total incorrect notes /351	Total omitted notes /351	Total added notes
----	--------------------------	---------------------	----------------------------	--------------------------	-------------------

TB	233	66.4	3	115	1
G1	64	18.2	1	286	0
G2	118	33.6	0	233	1
G3	135	38.5	8	208	3

2.3.2 Musicality. The quality of performance was assessed by two guitar professors in two different Montreal universities with more than 40 years of experience each who were unaware of the study design. The experts were instructed to assess the quality of the performance only and to disregard memorization. To ensure compliance, the judges were not provided with the original piece and were previously unfamiliar with it. They were instructed not to attempt to determine if the musicians were playing the correct notes or not. All renditions were presented as anonymized audio files in different random orders. The judges first listened to all performances, then, on second listen, they rated each on five musical qualities (pleasantness, hesitations, level of mastery, expressivity, and tempo stability), on a scale of 1 to 7 (see Appendix A for the list of questions). Finally, the judges ranked the performances from best to poorest interpretation.

The results indicate that both judges rated TB's performance with the best score on each of the 5 qualities. The first judge gave maximal ratings to TB's performance on all qualities. Importantly, when asked to rank the performances, both judges considered TB's performance to be the best interpretation.

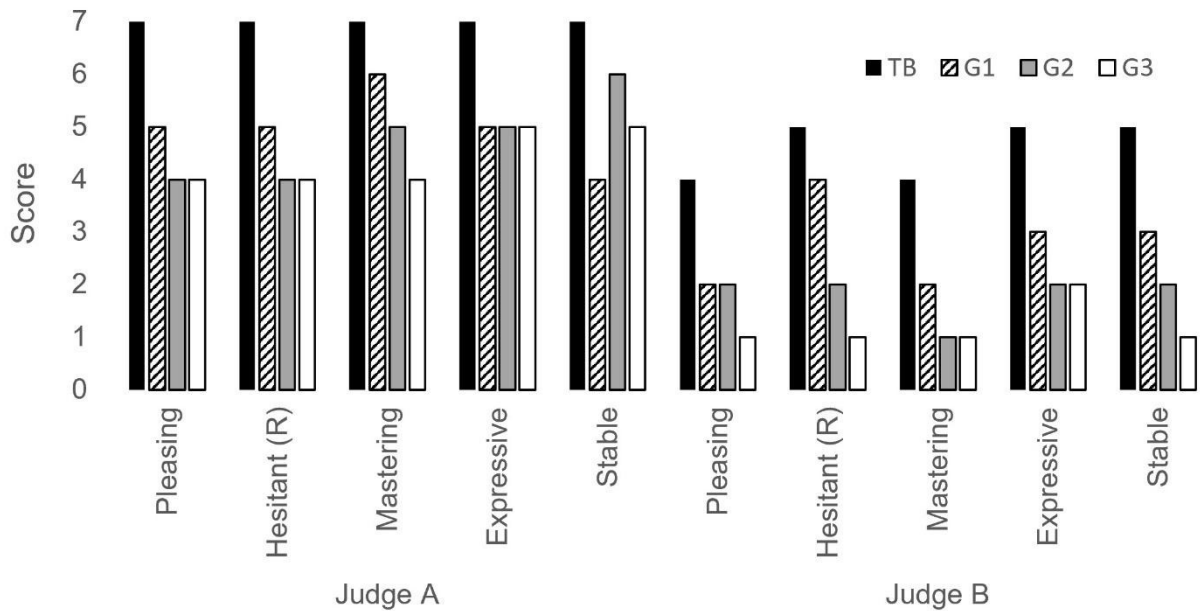


Figure 2. Detailed quality of performance scores for TB and guitarists, by judge.

2.3.3 The use of strategies during rehearsal time. Differences in memorization on the guitar learning task could reflect different use of strategies (Jorgensen and Hallam, 2016). For our analysis of the strategies used during rehearsal, we used Nielsen's (1999) classification of learning strategies. As this classification was determined by studying musicians who were practicing over a longer period (4 to 6 weeks) a work to be played in concert with the score, we adapted it. We used Nielsen's three primary strategies, which are: *Selection strategies*, *Organising strategies*, and *Integration strategies*. *Selection strategies* are strategies to select the relevant parts of learning material or problem areas (i.e., sight reading and visual analysis). *Organising strategies* include strategies to join parts of the piece together (e.g., play from the beginning, or play a larger section) and strategies to sort parts (had a new section), to which we added a sub-category of strategies for memorization (e.g., repeat a bar until memorized, play by heart). *Integration strategies* are strategies to relate the learning material to existing knowledge (other than guitar, e.g., foot tapping,

singing). We discarded Nielsen's support strategies category as these are related to extended periods of practice and to the preparation of a concert. The video recordings of the practice sessions were analysed using the Encode Online Platform (Dubé, 2013), which allowed to identify the strategies used and to code their frequency of use.

Table 4.

Strategies used by the participants and their frequency of use during the guitar learning task

	TB		G3		G2		G1	
Guitar learning task results (ranked)	68%		38%		34%		18%	
Measure	Nb ¹	Freq ¹	Nb	Freq	Nb	Freq	Nb	Freq
Selection strategies								
Strategies to select relevant problem areas	1	1	2	2	1	2	0	0
Organisation strategies								
Strategies to join parts of the piece together	8	27	2	4	4	22	4	23
Strategies to sort parts	4	20	3	6	5	29	2	7
Strategies for memorization	5	35	0	0	2	15	3	6
Integration strategies								
The use of prior musical knowledge	3	16	0	0	2	17	3	19
Total	21	99	7	12	14	85	12	55

1. Measures are the number of different used strategies belonging to that category (Nb) and the frequency of use of these strategies (Freq).

TB used a larger repertoire of strategies during practice (Table 4). He also used strategies more frequently, simultaneously and/or changing them more often than other participants. Notably, TB used strategies for memorization more often than the others. The participant with the second highest score for the guitar piece learning task, G3, used the least strategies overall.

Efficiency may explain the inconsistent results. For example, participant G1 used the strategies related to prior musical knowledge like "foot tapping" and "singing", but was not on the beat, had difficulty keeping tempo and was often singing out of tune. Replaying sections, G1 made new reading errors that were not in the previous trials. In comparison, TB showed greater ability in mastering all strategies used as well as better reading skills, thus playing with only a few mistakes. TB played with musicality (phrasing, vibrato, dynamics) throughout the practice period.

2.4 Verbal learning and memory.

The guitarists' verbal learning abilities were assessed using a French adaptation of the California Verbal Learning Test (CVLT-II; Delis, Kramer, Kaplan, & Ober, 2000). The CVLT-II assesses learning, recall (immediate and delayed) and recognition of two lists of words (A and B).

Throughout the learning phase, TB recalled the highest number of correct words (5 trials; see figure 3). At the second trial, after hearing the list of 16 words two times, TB could recall 15 of them correctly, against 8 to 12 in the controls. This corresponds to two standard deviations above the mean in the population (norms from the CVLT-II manual, for 30-44 years old men). This test also indicates that TB maintained the learning after a 20-minutes delay (all 16 words) and obtained a perfect score at the recognition phase of the test (e.g. indicating whether the presented word was in the list).

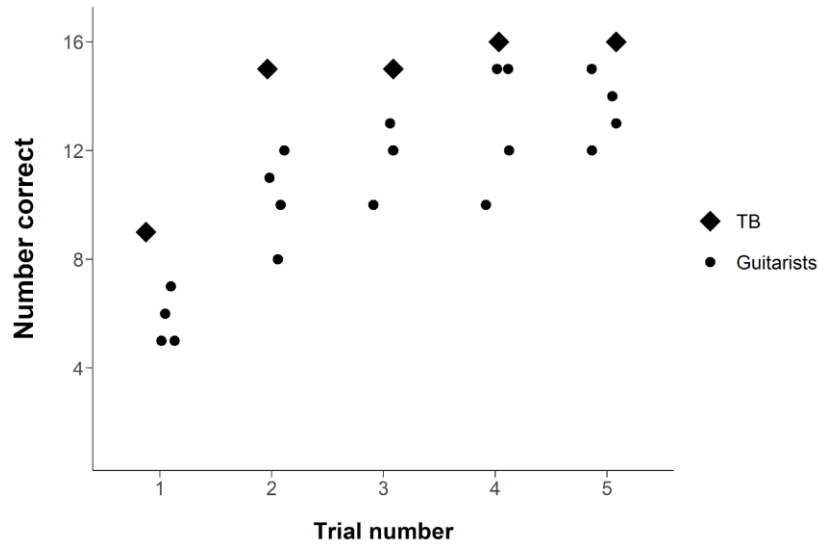


Figure 3. Results to the California Verbal Learning Test (CVLT-II): number of correctly recalled words on the first 5 trials (list A), points jittered horizontally.

The list of words participants had to learn is made of 16 words divided in 4 categories: animals, vegetables, furniture and transportation. The list is presented to them orally, in a way that the words are not grouped by categories, and in the same order every time and for every participant. A useful strategy is to cluster together words by their semantic category, which makes the recall easier. However, during the 5 trials of the learning phase, TB made the least amount of clustering of words (5 occurrences) by category compared with the control participants (10, 7, 6 and 21 occurrences in G1 to G4, respectively).

2.4 Memory and cognitive abilities

We also measured performance on other tasks involving music and general memory in a larger control sample of musicians with similar training in addition to the guitarists above (see Participants, table 1).

2.4.1 Melody learning. We designed an auditory melody learning task as part of a forthcoming study on musical learning. Data here are limited to a single session and subset of those participants because of the scheduling constraints of TB. On each trial, participants heard a short

melody (28 synthesized tones) and sang back as much as possible. The melody was presented again, with 10 blocked attempts per melody, and four melodies total (2 tonal, 2 atonal). Performance was assessed by measuring the proportion of the sung contour that matched the actual melody contour for each trial (score of 0–1), and then calculating an overall score across all ten trials (area under the curve or AUC, score of 0–1) and, finally, averaging scores by tonality and overall.

TB performed better across the entire task than all controls (TB's score = .87, ranked 1st) but his performance did not reach a statistically significant difference when compared with controls as a group (control $M = .70$, $SD = .10$, $t(15) = 1.65$, $p = .120$, $z_{cc} = 1.700$). When considering melodies separately by tonality, TB ranked first in the atonal condition (TB's score = .84; control $M = .65$, $SD = .12$), and ranked 3rd in the tonal condition (TB's score = .90; control $M = .76$, $SD = .11$).

2.4.2 Music perception. The Musical Ear Test (MET; Wallentin et al., 2010) assesses melodic and rhythmic perception. The test is divided in two sections of 52 items each, melody and rhythm. Each item consists of two stimuli of 3 to 8 sounds (piano for melody and claves for rhythm) that are the same or differ in a single event. Participants must decide whether the two musical excerpts are identical or not (Yes/No). The trials are presented as a pre-recorded audio file via headphones, and answers are collected using a response sheet and pencil. Testing took place individually in an audio booth preventing distractions from external stimuli. The presented scores are the raw scores, which correspond to the total correct answers on a total of 52 items in each condition (melody and rhythm).

In the melody subtest, TB had the highest performance, and is the only participant with a perfect score (100%), with more than 2 standard deviations from the control sample's mean. Statistically, TB was not higher than the sample mean (control $M = 45.3$, $SD = 3.2$, TB's score =

52, $t(15) = 2.03$, $p = .060$, $z_{cc} = 2.094$), but a true estimate was precluded by his ceiling performance. In the rhythm condition, TB and 3 controls obtained the second highest score (45). However, TB did not significantly distinguish from the control group in this condition ($M = 41.0$, $SD = 4.2$, $t(15) = 0.92$, $p = .370$, $z_{cc} = 0.952$).

Compared to a population of 98 musicians with equal or more than 10 years of training (Swaminathan et al., 2021), TB's score is 2.65 standard deviations above the mean. Moreover, TB's performance is 3 points higher than the best score obtained (49) in this population of trained musicians in which none reached the ceiling score. For the rhythm subtest, TB's score is 1.32 standard deviation above the mean in the trained musician population.

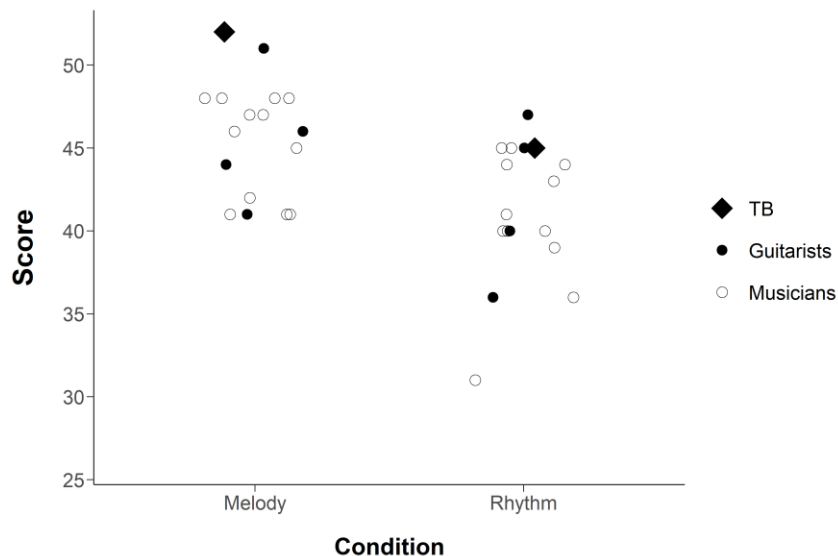


Figure 4. Total correct responses on a total of 52, at the Musical Ear Test (MET) by condition, points jittered horizontally.

2.4.4 IQ and working memory. Intellectual abilities were assessed using the WAIS-IV (Wechsler, 2008, Canadian Manual). The WAIS-IV is a standardised test which has been normalised in Canada and is available in French. Individual scores can be compared against the general population using normative data from the manual ($M = 100$, $SD = 15$). The WAIS-IV

includes the Digit Span subtest (see Figure 5, left panel), and another subtest in the auditory modality, but no visual-spatial task. In order to investigate working memory in the visual-spatial modality, the Spatial Span subtest from the MEM-III (Wechsler, 2001) was administered (see Fig. 5, right panel). Raw scores from the Digit Span and Spatial Span subtests were used. One participant could not perform the visual working memory task due to time constraints. Moreover, one musician performed an abbreviated version of the WAIS (WASI-II; Wechsler, 1999), which allows one to calculate an IQ estimate, but does not include the Digit Span. Results from the global IQ, as well as the Spatial Span subtest were part of a previous publication which included a larger sample of participants (Marion-St-Onge et al., 2020).

TB obtained a normalised global IQ score at the 82th percentile compared to the general population, which is near the mean of the control sample (control $M = 113.8$, $SD = 9.8$, range 96–124; $t(15) = 0.02$, $p = .984$, $z_{cc} = 0.020$). Results to the Spatial Span subtest, (Figure 5, right panel) indicate that TB performed better (raw score = 26) than the control sample (control $M = 20.07$, $SD = 2.02$; $t(14) = 2.84$, $p = .013$, $z_{cc} = 2.936$ (95% CI = 1.738 to 4.114). TB did not distinguish himself (raw score = 35; standard score = 13) from the sample in the Digit Span subtest (control $M = 31.67$, $SD = 5.60$; $t(14) = 0.58$, $p = .574$, $z_{cc} = 0.595$; Figure 5, left panel).

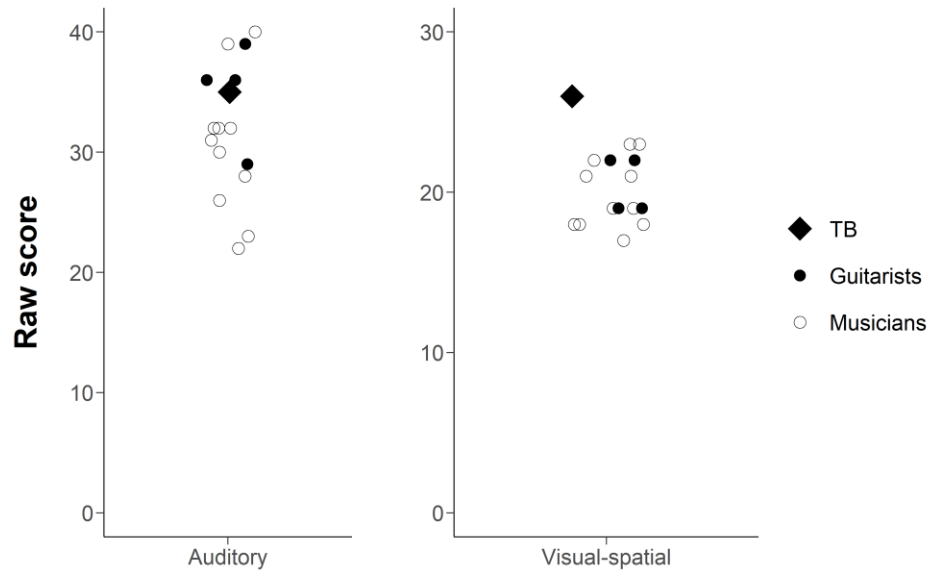


Figure 5. Working memory performance scores, by modality. Auditory working memory is measured with the Digit Span subtest of the WAIS-IV (left panel), and the Visual-spatial working memory is measured with the Spatial Span subtest from WMS-III (right panel). Raw scores are not directly comparable between tasks, points jittered horizontally.

TB was also administered the supplementary WAIS-IV subtest Letter-Number Sequencing, measuring auditory-verbal working memory. It was not administered to the other participants because of subsequent changes in the protocol. In the Letter-Number Sequencing test, TB obtained a raw score of 27 items correctly recalled. This performance corresponds to a scaled score of 18 according to the WAIS-IV Canadian Manual. We can consider this performance as very superior (> 99th percentile) to the mean in the population.

2.5 Flow

To measure flow experienced during music practice, we made a French adaptation of the Dispositional Flow Scale 2 (Jackson and Eklund, 2004). The questionnaire was also adapted for musical practice so that items followed the statement “When I practice my instrument. . .” There were 36 items each rated on a 5-point scale (1 = never to 5 = always). A global score was obtained

by calculating the mean score across items. Flow results are missing for 4 participants, as this scale was administered online after participants came to the lab, and some participants could not be reached. Results from the adapted Dispositional Flow Scale 2 were part of a previous publication, which included a larger sample of participants (Marion-St-Onge et al., 2020).

TB obtained the highest score ($M = 4.5$) among controls, (control $M = 3.69$, $SD = 0.51$), but did not significantly distinguish from the control sample, $t(12) = 1.53$, $p = .152$, $z_{cc} = 1.588$.

2.6 Brain imaging

Structural and functional magnetic resonance imaging was performed at the Unité de Neuroimagerie Fonctionnelle, Centre de recherche de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal using a Siemens 3-tesla Magnetom Prisma Fit scanner with a 64-channel head coil. Whole-brain T1-weighted images were acquired with a gradient recalled inversion recovery sequence, with repetition time = 2400 ms, echo time = 2.33 ms, flip angle = 9, field of view = 288 mm \times 288 mm, slice thickness = 0.8. Functional resting state images (rs-fMRI) were obtained using a T2*-weighted echo-planar sequence to capture BOLD signal with repetition time = 800 ms, echo time = 30 ms, flip angle = 52, 90 \times 90 imaging matrix, and a multiband acceleration factor = 6. TB and all but one of the musician controls (a guitarist, G1) described above were scanned.

The rs-fMRI data were pre-processed and analyzed using the CONN functional connectivity toolbox (20.b; www.nitrc.org/projects/conn, RRID:SCR_009550) in SPM12 (Statistical Parametric Mapping software; Wellcome Department of Imaging Neuroscience, University College London, London, UK). Pre-processing used the default preprocessing pipeline in the CONN toolbox, which included realignment and unwarping (motion correction), slice-timing correction, outlier identification, segmentation and normalisation to MNI space, re-sampling into 2 \times 2 \times 2 mm voxels, and spatial smoothing (Gaussian FWHM = 8 mm). Denoising was performed

using aCompCor with 10 components included for white matter and CSF, 18 components for motion parameters and their first- and second-order derivatives, as well as scrubbing, linear detrending, and bandpass filtering from 0.008 0.09 Hz. Whole-brain connectivity was assessed using the intrinsic connectivity contrast (Martuzzi et al, 2011), and regions of interest (ROIs) analyses included seeds in auditory-frontal networks, sensorimotor networks, and the default mode network defined using the Harvard-Oxford atlas-based seeds available in the CONN toolbox: auditory cortex (superior temporal gyrus), sensorimotor cortex (precentral and postcentral gyri), prefrontal cortex (lateral, medial, superior), posterior parietal cortex, caudate, cingulate (anterior, posterior), and cerebellum. Correlations between seeds and voxels within ROIs were thresholded at $p < .001$ and cluster-corrected using false discovery rate (FDRc) at $p < .05$.

The structural data were pre-processed and analyzed using FreeSurfer v. 7.1.1 (Athinoula A. Martinos Center for Biomedical Imaging, Harvard-MIT, Boston), running on Ubuntu 20, to automatically parcellate and segment cortical and subcortical structures and to generate cortical thickness and volumetric measurements. Parcellations and segmentations were manually inspected and corrected where necessary. Volumetric and cortical thickness measurements for ROIs (caudate, hippocampus, cerebellum, superior frontal cortex, primary motor cortex, auditory cortex) were obtained in each individual's native space using the Desikan-Killiany atlas and compared using the same modified independent samples t-test used in the behavioural data above. Cortical thickness maps for whole-brain comparisons between TB and the musician control group were generated by mapping to fsaverage space, using a surface-based smoothing kernel of 10 FWHM, and modeled using DOSS (different offset, same slope) and a vertex-level significance threshold of $p = .001$ for two-tailed tests, with cluster correction for multiple comparisons ($p = 0.05$), using FreeSurfer's `mri_glmfit-sim`.

After correction for multiple comparisons, there were no significant differences in cortical thickness maps between TB and the musician control group, although we note that TB's cortical thickness measurements tended to be thinner both for mean cortical thickness (z-score for thickness across all vertices compared to the control group was -0.39) and for a number of ROIs (Figure 6). During data QA checks, we noticed that the cingulate cortex, and particularly the left isthmus of the cingulate, did not follow this trend and appeared thicker in TB than controls. Using the independent samples t-test modified for case studies, we found a significant difference between TB and controls in the left isthmus of the cingulate, $t(15) = 2.54$, $p = .023$ (two-tailed test), $z_{cc} = 2.62$ (95 % CI = 1.56 – 3.64). This seemed unusual across a backdrop of average and below average thickness (compared to the musician controls). The isthmus of the cingulate is thought to be involved in attention regulation and internally-directed cognition (Leech & Sharp, 2014), and thus might be related to flow. We found a significant positive correlation between cortical thickness in the left isthmus of the cingulate and scores on the flow scale, $r(11) = .58$, $p = .037$, 95% CI: [.05, .86]. However, this result should be interpreted with caution given that it was calculated with a smaller sample (the flow scale was only obtained for 12 of 16 controls) and has a wide confidence interval.

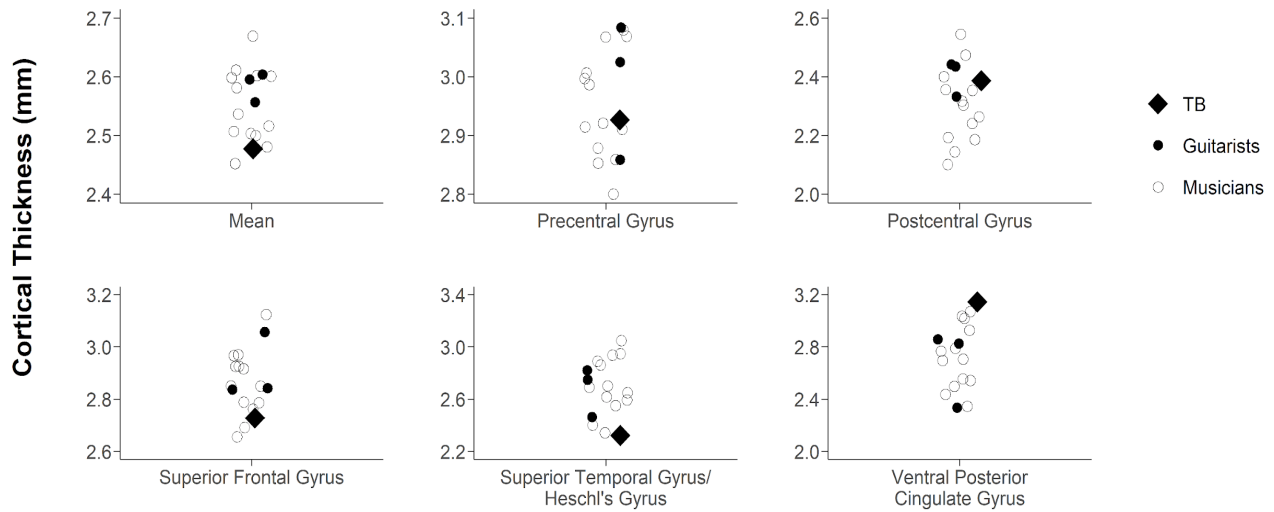


Figure 6. Cortical thickness estimates (average of left and right hemispheres) in mm for the mean of the whole cortex and regions of interest – precentral gyrus, postcentral gyrus, superior frontal gyrus, superior temporal gyrus/Heschl's gyrus, and ventral posterior cingulate gyrus, respectively.

For the volumetric analyses, there were no significant differences in estimated total intracranial volume, and no significant differences in cerebellar, caudate, or hippocampal volumes (Figure 7), although we once again note that, while not significant, TB had smaller hippocampi compared to the musician controls. Given the focus of this study on TB's exceptional memory and the vast literature around the role of the hippocampus in learning and memory, we checked whether there was any relationship between the melody learning task and hippocampal volumes, but did not find a correlation.

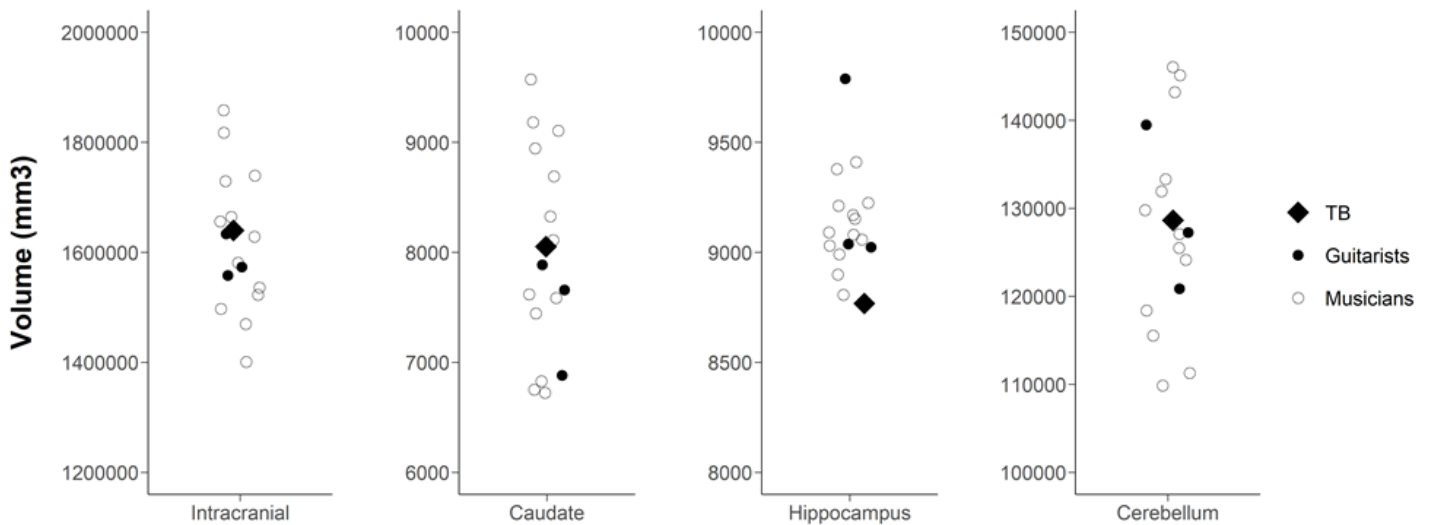


Figure 7. Estimated total intracranial volume, caudate volume (left + right), hippocampal volume (left + right), and cerebellar volume (left + right), respectively.

Given that widespread changes in functional connectivity across numerous regions and networks have been reported in Tourette syndrome (Greene, Schlaggar, & Black, 2015; Nielsen et al., 2020), we used an intrinsic connectivity contrast to look at whole-brain connectivity. TB showed greater connectivity than controls in right parietal operculum (secondary somatosensory cortex) and Heschl's gyrus (Figure 8A), while there were no significant clusters in controls that showed greater connectivity than TB. We also used seed-to-voxel analyses to investigate ROIs within auditory-frontal and sensorimotor networks, each having the potential to be impacted by Tourette syndrome and/or musicianship. Musicians showed greater connectivity between the lateral pre-frontal cortex seed and auditory cortex, between the caudate seed and auditory cortex, and between the anterior cingulate seed and the caudate than TB (Figure 8B, 8D, and 8E), while TB had greater connectivity between medial prefrontal cortex seed and the middle frontal gyrus/frontal pole (Figure 8C) and between the anterior cingulate seed and the middle and inferior temporal gyri (Figure 8E). The majority of ROIs did not show significant differences. Although

there are some small distinctions, functional connectivity appears to be similar between TB and musician controls.

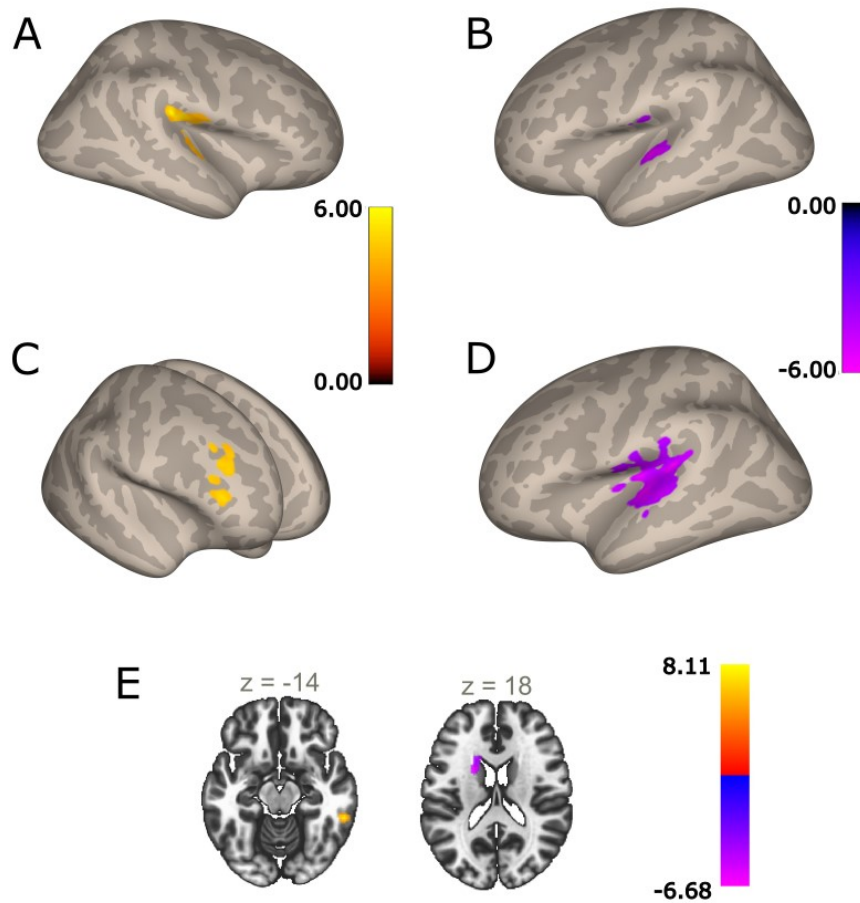


Figure 8. A: Intrinsic connectivity contrast, showing clusters of voxels (corrected for false discovery rate) where the strength of the connectivity between those voxels and the rest of the brain was greater in TB than in controls. B-D: Seed-based analyses, showing clusters of voxels (corrected for false discovery rate) where TB had greater (hot colours) or less (cool colours) functional connectivity than controls from seeds in lateral prefrontal cortex (B), medial prefrontal cortex (C), caudate (D), and anterior cingulate (E).

3. Discussion

To win a music performance competition requires to play a piece better than other musicians, and to play it from memory. This is something TB does very well considering he has won many national and international competitions. TB reported quick memorization of new pieces. This claim was objectively confirmed in this study using a time-constrained guitar piece learning task. TB learned at least around 1.5 (1.7) times the number of notes compared to three trained classical guitarists.

His performance was of better overall musicality (i.e. pleasantness, hesitations, level of mastery, expressivity, and tempo stability) as assessed by two experts. Thus, TB's better memorization did not impede musicality. As in (Lisboa et al., 2018), musicality and memorization can be closely linked together, as the "artistic image" of the piece provides a structure and cues to important transitions.

The analysis of strategies during rehearsal did not yield strong conclusions but suggests avenues for future research. Quantitative analysis of the recorded practice sessions suggests that the diversity of strategies used and their frequency of use were not a good indicator of memorization. However, qualitative appreciation of the practice session from a guitar professor [Isabelle Héroux] observed that strategies could be used inefficiently by the participants (e.g. making reading mistakes while sight-reading), and that TB seemed more efficient (e.g. mistake-free sight reading). A similar phenomenon was observed in advanced pianists who are more successful to correctly learn a new piece in one sitting (Duke et al., 2009), as they tended to better locate and correct errors during rehearsal, and to avoid repeating those mistakes (Duke et al., 2009). Whether TB's lower erroneous use of strategies had an impact on memorization is unclear and would require further investigation.

Performance to the guitar piece learning task could have been influenced by instrument-specific strategies, but TB's ability to learn new guitar pieces from memory appears to generalize to other musical contexts. In the melody learning task, which used singing rather than guitar and learning by ear rather than by sheet music, TB performed among the best of his musically-trained peers on the task overall and better than all others on atonal melodies (i.e. unfamiliar musical system), but without being statistically different from the control group.

On tasks of melodic and rhythm perception, TB was among the best performers tested. Notably, TB got a perfect score on the melodic subtest, a ceiling effect that may have underestimated his true ability. The current sample performed particularly well on this subtest, with group performance 1.13 (melody) and 0.50 (rhythm) standard deviations above the population means for trained musicians reported elsewhere (Swaminathan et al., 2021). Seemingly elevated performance in the current sample could be related to different metrics of musical experience, hours of practice $\geq 10,000$ hours in our sample compared to years of music lessons ≥ 10 years in Swaminathan et al. (2021). In comparison to the norms from trained musicians in that study, TB's melodic perception is in the 99th percentile. How or whether this heightened ability to perceive melodic information might help TB when learning new pieces with few mistakes is unknown, but makes an interesting avenue for future investigations.

TB's IQ did not differ from the mean in the control musician's sample. Both TB's and the group mean correspond to the high average level compared to the general population (Heaton, 2004).

TB's memory was superior in general. For the Digit Span (see Figure 5), TB's performance was at the 84th percentile in the general population, and almost 1 standard deviation above the musician controls, but TB does not statistically stand out from the musician controls on this task. Using another auditory-verbal working memory task that was used exclusively with TB (Letter-

Number Sequencing), performance was above the 99th percentile of the general population. TB's visual-spatial working memory statistically stood out from the sample (2.8 standard deviations above the musician controls'). Overall, TB's performance to working memory tests can be considered as superior across modalities.

Superior performance to visual-spatial working memory task in TB is in line with evidence suggesting that visual working memory capacity predicts sight reading (Meinz and Hambrick, 2010). Considering that the guitar piece learning task involved sight reading, superior visual-spatial working memory might have contributed to TB's greater number of notes learned. It is possible that visual-spatial working memory, through a better spatial representation of the hands moving on the guitar's neck, might be relevant for figuring out and memorizing the complex guitar fingerings of a novel piece.

In special populations with exceptional memory (e.g., savants, HSAM, super-recognizers), abilities are usually restricted to their field of interest. Here, not only did TB show an advantage at quickly learning a new guitar piece, he also outperformed the other guitarists in learning a list of words. His learning curve was especially steep. The list of words was well maintained in memory after a delay of 20 minutes, as it was in the controls. Interestingly, TB's performance cannot be explained by the use of a strategy commonly used in this test, semantic grouping. But there are some limitations with this test. Only a few control participants underwent this task. The CVLT-II is a tool designed to assess memory and learning in a clinical population, so its design might preclude to capture higher ability levels. Still, results suggest his rapid learning abilities might be generally good, not just for new guitar pieces, and not just for musical content.

The Gilles de la Tourette syndrome could have played an idiosyncratic role in TB's exceptional talent development. Impairments in Tourette's syndrome often include impairments in

fine and gross motor dexterity, as well as inhibition (Morand-Beaulieu et al., 2017). Yet, the condition did not limit TB's musical success. Many individuals with Tourette's report managing motor tics through the use of calm, focused activities (National Institute of Neurological Disorders and Stroke, 2019) such as playing music (Bodeck et al., 2015). Indeed, TB considers the syndrome and musical talent as being intricately linked together. Music practice was an outlet allowing attention channeling, the reduction of motor symptoms, and equilibrium. The spasm reducing effect of music practice motivated TB to practice. According to Baddeley et al. (2014), motivation plays an indirect role in learning by influencing the amount of time and the level of attention allocated to the material to learn (Baddeley et al., 2014, pp. 115). In TB's case, the Gilles de la Tourette syndrome might have encouraged focused practice because of its impact on tics reduction.

Deep concentration is a quality attributed to a state of flow (Csikszentmihalyi, 1990). TB scored the highest on a questionnaire assessing flow during musical practice in general (i.e., not after the rehearsal session specifically). Many elements of flow can also be drawn from TB's interviews with us and with the media: an experience of "fusion" with the instrument, complete concentration during practice and performance, loss of the notion of time (e.g., can practice for 6 hours in a row), and reduced awareness of distracting stimuli (e.g., did not notice that 4 trains had passed during his performance). Subjective flow experience, in particular absorption in the task, is higher when the task's difficulty matches one's skill level (Harris et al., 2017). Subjective flow has also been associated to physiological indicators of attention (de Manzano et al., 2010; Harris et al., 2017; Peifer, Schulz, Schächinger, Baumann, & Antoni, 2014). It is thus interesting to note that we noticed a significant difference between TB and the controls in the cortical thickness of the left isthmus of the cingulate, a region that has been suggested to have a role in attention regulation (Leech & Sharp, 2014). Intriguingly, cortical thickness in this region significantly correlated with

the flow scale score in our sample (14 out of 17 completed both scan and flow scale). However, the link between this region and the propensity to experience flow has not been previously evidenced, so this would require independent verification in a larger sample.

Otherwise, preliminary investigations into TB's brain structure suggest that his brain has been shaped both by his long-term music training and by his Tourette syndrome. Using strict statistical comparisons, he is not significantly different from a group of highly-trained musicians, yet he appears to lie at the lower end of the sample distribution for cortical thickness and hippocampal volume despite having very good performance across most of the tasks measured. We might speculate that his early and extensive music training, which may increase cortical thickness and hippocampal volumes (reviewed in Olszewska et al., 2021), has interacted with Tourette syndrome, which may lead to cortical thinning (Draganski et al., 2010; Worbe et al., 2010) and reduced hippocampal volumes (Peterson et al., 2007). Thus, his brain may not be quite like the average highly-trained musician, but also not like the typical pattern seen in Tourette syndrome. A previous study has uncovered this type of interaction between music training and disease, such that music training ameliorated the typical decrease in hippocampal volume observed in congenital hypothyroidism (Zendel, Willoughby, & Rovet, 2013).

Although there may be features of TB's brain that have not yet been uncovered that could underlie his exceptional abilities, our current investigations have not revealed any particular differences in brain structure or function that are likely to explain his significantly better behavioural performance and excellent memory compared to other accomplished musicians. A few differences in functional connectivity were found, including that TB's secondary somatosensory cortex and Heschl's gyrus showed stronger connectivity with the rest of his brain. TB also showed increased connectivity compared to controls between medial frontal and more lateral frontal

regions and reduced connectivity between the caudate and numerous regions. How these differences might be related to musicianship or cognitive performance is not clear and may simply reflect alterations related to his Tourette's syndrome (Bhikram, Arnold, Crawley, Abi-Jaoude, & Sandor, 2020; Greene, Schlaggar, & Black, 2015; Nielsen et al., 2020).

Working memory might be relevant in some cases of musicians who reach high levels of musical achievement early in life. Elevated working memory has been reported here and previously in studies with musical prodigies (Ruthsatz et al., 2014; Ruthsatz & Urbach, 2012), but not in a larger group of such early achievers compared with controls (Marion-St-Onge et al., 2020). It is thus plausible that different paths, or combination of factors, can lead to the precocious development of exceptional musical skills and to exceptional musical memory in adulthood.

In the broader light of expertise models like the Multifactorial Gene-environment Interaction Model (F. Ullén et al., 2016), we can conceptualize TB's expertise as emerging from a complex interaction between clearly superior abilities (memory, melodic perception), but also dedicated practice, motivation/flow, a neurodevelopmental disorder, and brain development.

4. Limits and future studies:

The use of a case study, while it offers a privileged access to an individual's characterization, precludes from generalization.

An interesting avenue for future studies would be to assess flow with subjective and physiological measures during a musical piece learning task in a larger group of musicians and verify whether flow predicts the learning rate.

Other future studies could also assess whether a faster learning rate is a hallmark of early achievers in general, as it has been suggested by Gagné and McPherson (2016).

Future studies should investigate how brain function and structure characterize early achieving musicians using group comparisons.

5. Data availability statement

Here we reported data related to a unique individual that released press interviews. The conditions of our ethics approval do not allow public archiving of data since even anonymized, it is not possible to rule out any link to the individual's identity. Readers seeking access to the data should contact the senior author I.P., [mailto: isabelle.peretz@umontreal.ca](mailto:isabelle.peretz@umontreal.ca).

6. Ethics statement

The studies were reviewed and approved by the Comité d'éthique de la recherche en éducation et en psychologie (CEREP), University of Montreal, Montreal, Canada, and by the Comité d'éthique de la recherche vieillissement-neuroimagerie, Centre intégré universitaire de santé et de services sociaux du Centre-Sud-de-l'Île-de-Montréal. Written informed consent to participate in this study was provided by the participants.

7. Author contributions

Chanel Marion-St-Onge: Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Investigation, Data Curation, Writing - Original Draft, Writing - Review & Editing, Visualization, Project administration

Isabelle Héroux: Conceptualization, Methodology, Investigation, Writing - Original Draft, Writing - Review & Editing, Visualization, Supervision

Michael W. Weiss: Methodology, Formal analysis, Data Curation, Writing - Original Draft, Writing - Review & Editing, Visualization

Dawn Merrett: Data Curation, Formal analysis, Writing - Original Draft, Writing - Review & Editing, Visualization,

Margot Charignon: Methodology, Investigation, Writing - Original Draft, Writing - Review & Editing

Isabelle Peretz: Conceptualization, Methodology, Resources, Writing - Review & Editing, Supervision, Funding acquisition

8. Funding

The work is funded by the program of Canada Research Chairs (IP). CM is supported by a scholarship from the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada. MW is supported by the Fonds de Recherche du Québec – Nature et Technologies. DM is supported by the Fonds de Recherche du Québec - Santé.

9. Acknowledgements

We thank our two guitar experts, Peter McCutcheon and Patrick Kearney, for their musicality judgements of the guitarists' performances.

We thank Megha Sharda for her contribution to the project.

We also thank Véronique Martel and Lydia Trudel for their help at translating the Flow Scale in French.

We thank Nadim Emond for helping with the practice strategies analysis and Francis Dubé for access to the Encode software.

And finally, a big thank you to TB, who inspired us to start the project and who enthusiastically shared his time to participate in this investigation.

10. References

Baddeley, A., Eysenck, M.W., Anderson, M.C., 2014. *Memory* (2nd edn). Hoboken Taylor Fr.

Bhikram, T., Arnold, P., Crawley, A., Abi-Jaoude, E., & Sandor, P. (2020). The functional connectivity profile of tics and obsessive-compulsive symptoms in Tourette Syndrome. *Journal of Psychiatric Research*, 123, 128-135. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jpsychires.2020.01.019>

Bodeck, S., Lappe, C., Evers, S., 2015. Tic-reducing effects of music in patients with Tourette's syndrome: Self-reported and objective analysis. *J. Neurol. Sci.* 352, 41–47.

Butkovic, A., Ullén, F., Mosing, M.A., 2015. Personality related traits as predictors of music practice: Underlying environmental and genetic influences. *Pers. Individ. Dif.* 74, 133–138. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2014.10.006>

Cavanna, A.E., Eddy, C., Rickards, H.E., 2009. Cognitive functioning in Tourette syndrome. *Discov. Med.* 8, 191–195.

Chaffin, R., Demos, A.P., Logan, T., 2016. Performing from memory, in: Hallam, S., Cross, I., Thaut, M. (Eds.), *The Oxford Handbook of Music Psychology*. Oxford University Press New York, New York, pp. 559–571.

Chaffin, R., Imreh, G., 2002. Practicing perfection: Piano performance as expert memory. *Psychol. Sci.* 13, 342–349. <https://doi.org/10.1111/j.0956-7976.2002.00462.x>

Chaffin, R., Lisboa, T., Logan, T., Begosh, K.T., 2010. Preparing for memorized cello performance: the role of performance cues. *Psychol. Music* 38, 3–30. <https://doi.org/10.1177/0305735608100377>

Chaffin, R., Logan, T., 2006. Practicing perfection: How concert soloists prepare for performance. *Adv. Cogn. Psychol.* 2, 113–130. <https://doi.org/10.2478/v10053-008-0050-z>

Chaffin, R., Logan, T.R., Begosh, K.T., 2008. Performing from memory. *Oxford Handb. Music Psychol.* 352–363. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199298457.013.0033>

Chase, W.G., Simon, H.A., 1973. Perception in chess. *Cogn. Psychol.* 4, 55–81. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(73\)90004-2](https://doi.org/10.1016/0010-0285(73)90004-2)

Comeau, G., Lu, Y., Swirp, M., Mielke, S., 2018. Measuring the musical skills of a prodigy: A case study. *Intelligence* 66, 84–97. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2017.11.008>

Comeau, G., Vuvan, D.T., Picard-Deland, C., Peretz, I., 2017. Can you tell a prodigy from a professional musician? *Music Percept.* 35, 200–210. <https://doi.org/10.1525/MP.2017.35.2.200>

Cowan, N., 2001. The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behav. Brain Sci.* 24, 87–114.

Crawford, J.R., Garthwaite, P.H., Porter, S., 2010. Point and interval estimates of effect sizes for the case-controls design in neuropsychology: Rationale, methods, implementations, and proposed reporting standards. *Cogn. Neuropsychol.* 27, 245–260. <https://doi.org/10.1080/02643294.2010.513967>

Dakon, J.M., 2013. A Descriptive Examination of Aural and Visual Practice Strategies Exhibited by Beginning-Level String Students when Memorizing Music Material. *String Res. J.* 4, 37–53. <https://doi.org/10.1177/194849921300200403>

Dalla Bella, S., Sowi, J., Farrugia, N., Berkowska, M., 2016. Igor : A case study of a child drummer prodigy Igor : A case study of a child drummer prodigy, in: McPherson, G.E. (Ed.), *Musical Prodigies: Interpretations from Psychology, Education, Musicology, and Ethnomusicology*. Oxford University Press, Oxford, pp. 391–408.

Delis, D.C., Kramer, J.H., Kaplan, E., Ober, B.A., 2000. *California Verbal Learning Test—Second Edition (CVLT-II)*. San Antonio, TX Psychol. Corp.

Draganski, B., Martino, D., Cavanna, A. E., Hutton, C., Orth, M., Robertson, M. M., . . . Frackowiak, R. S. (2010). Multispectral brain morphometry in Tourette syndrome persisting into adulthood. *Brain*, *133*(12), 3661-3675. doi:10.1093/brain/awq300

Drost, U.C., Rieger, M., Brass, M., Gunter, T.C., Prinz, W., 2005. When hearing turns into playing: Movement induction by auditory stimuli in pianists. *Q. J. Exp. Psychol. Sect. A* *58*, 1376–1389.

Duke, R.A., Simmons, A.L., Cash, C.D., 2009. It's not how much; It's how: Characteristics of practice behavior and retention of performance skills. *J. Res. Music Educ.* *56*, 310–321. <https://doi.org/10.1177/0022429408328851>

Feldman, D.H., Morelock, M.J., 2020. Prodigies and Savants, in: Sternberg, R. (Ed.), *The Cambridge Handbook of Intelligence*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 258–290. <https://doi.org/doi:10.1017/9781108770422.013>

Ferreira-Correia, A., Anderson, D.G., Cockcroft, K., Krause, A., 2020. Single case-control design for the study of the neuropsychological deficits and dissociations in Huntington's disease-like 2. *MethodsX* *7*, 100782. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.100782>

Gagné, F., McPherson, G.E., 2016. Analyzing musical prodigiousness using Gagné's Integrative Model of Talent Development, in: McPherson, G.E. (Ed.), *Musical Prodigies: Interpretations from Psychology, Education, Musicology, and Ethnomusicology*. Oxford University Press, Oxford, pp. 3–114.

Greene, D. J., Schlaggar, B. L., & Black, K. J. (2015). Neuroimaging in Tourette Syndrome: Research Highlights from 2014 to 2015. *Current Developmental Disorders Reports*, *2*(4), 300-308. doi:10.1007/s40474-015-0062-6

Gobet, F., Simon, H.A., 1996. Templates in chess memory: A mechanism for recalling several boards. *Cogn. Psychol.* *31*, 1–40. <https://doi.org/10.1006/cogp.1996.0011>

Halpern, A.R., Bower, G.H., 1982. Musical expertise and melodic structure in memory for musical notation. *Am. J. Psychol.* 31–50.

Hambrick, D.Z., Macnamara, B.N., Oswald, F.L., 2020. Is the Deliberate Practice View Defensible? A Review of Evidence and Discussion of Issues. *Front. Psychol.* 11. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01134>

Herholz, S. C., Coffey, E. B. J., Pantev, C., & Zatorre, R. J. (2015). Dissociation of Neural Networks for Predisposition and for Training-Related Plasticity in Auditory-Motor Learning. *Cerebral Cortex*, 26(7), 3125-3134. doi:10.1093/cercor/bhv138

Herholz, Sibylle C., & Zatorre, Robert J. (2012). Musical training as a framework for brain plasticity: Behavior, function, and structure. *Neuron*, 76(3), 486-502.

Holmes, G.L., 2015. Cognitive impairment in epilepsy: the role of network abnormalities. *Epileptic Disord.* 17, 101–116. <https://doi.org/doi:10.1684/epd.2015.0739>

Jackson, S.A., Eklund, R.C., 2004. *The Flow Scales Manual*. Morgantown, WV, USA: Fitness Information Technology.

Janzen, T.B., Ammirante, P., Thompson, W.F., 2016. Development of timing skills, in: McPherson, G.E. (Ed.), *Musical Prodigies: Interpretations from Psychology, Education, Musicology, and Ethnomusicology*. Oxford University Press, Oxford, pp. 378–390. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199685851.003.0016>

Jorgensen, H., Hallam, S., 2016. Practising, in: Hallam, S. Cross, I. et Thaut, M. (Eds.), *The Oxford Handbook of Music Psychology* (2e Ed., Pp. 449-462). Oxford: Oxford University Press.

Kopiez, R., Lehmann, A.C., 2016. Musicological reports on early 20th-century musical prodigies: The beginnings of an objective assessment. *Music. prodigies Interpret. from Psychol. Educ. Musicol. Ethnomusicol.* 169–184.

Lane, D.M., Chang, Y.H.A., 2018. Chess knowledge predicts chess memory even after controlling for chess experience: Evidence for the role of high-level processes. *Mem. Cogn.* 46, 337–348. <https://doi.org/10.3758/s13421-017-0768-2>

Leech, R., & Sharp, D. J. (2014). The role of the posterior cingulate cortex in cognition and disease. *Brain*, 137(Pt 1), 12-32. doi:10.1093/brain/awt162

Lehmann, A.C., Ericsson, K.A., 1998. Preparation of a Public Piano Performance: The Relation between Practice and Performance. *Music. Sci.* 2, 67–94. <https://doi.org/10.1177/102986499800200105>

LePort, A.K.R., Mattfeld, A.T., Dickinson-Anson, H., Fallon, J.H., Stark, C.E.L., Kruggel, F., Cahill, L., McGaugh, J.L., 2012. Behavioral and neuroanatomical investigation of Highly Superior Autobiographical Memory (HSAM). *Neurobiol. Learn. Mem.* 98, 78–92. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2012.05.002>

Marion-St-Onge, C., Weiss, M.W., Sharda, M., Peretz, I., 2020. What makes musical prodigies? *Front. Psychol.* 11, 3244.

Martuzzi, R., Ramani, R., Qiu, M., Shen, X., Papademetris, X., & Constable, R. T. (2011). A whole-brain voxel based measure of intrinsic connectivity contrast reveals local changes in tissue connectivity with anesthetic without a priori assumptions on thresholds or regions of interest. *Neuroimage*, 58(4), 1044-1050.

Meinz, E.J., Hambrick, D.Z., 2010. Deliberate practice is necessary but not sufficient to explain individual differences in piano sight-reading skill: The role of working memory capacity. *Psychol. Sci.* 21, 914–919. <https://doi.org/10.1177/0956797610373933>

Merrett, D. L., Peretz, I., & Wilson, S. J. (2013). Moderating variables of music training-induced neuroplasticity: a review and discussion. *Front Psychol*, 4(606).

Miksza, P., 2011. Relationships among achievement goal motivation, impulsivity, and the music practice of collegiate brass and woodwind players. *Psychol. Music* 39, 50–67. <https://doi.org/10.1177/0305735610361996>

Miller, G.A., 1956. The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychol. Rev.* 63, 81.

Monaco, F., Servo, S., Cavanna, A.E., 2009. Famous people with Gilles de la Tourette syndrome? *J. Psychosom. Res.* 67, 485–490. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychores.2009.07.003>

Morand-Beaulieu, S., Leclerc, J.B., Valois, P., Lavoie, M.E., O'Connor, K.P., Gauthier, B., 2017. A review of the neuropsychological dimensions of tourette syndrome. *Brain Sci.* 7. <https://doi.org/10.3390/brainsci7080106>

Nielsen, A. N., Gratton, C., Church, J. A., Dosenbach, N. U. F., Black, K. J., Petersen, S. E., . . . Greene, D. J. (2020). Atypical Functional Connectivity in Tourette Syndrome Differs Between Children and Adults. *Biological Psychiatry*, 87(2), 164-173. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2019.06.021>

Olszewska, A. M., Gaca, M., Herman, A. M., Jednoróg, K., & Marchewka, A. (2021). How Musical Training Shapes the Adult Brain: Predispositions and Neuroplasticity. *Frontiers in Neuroscience*, 15(204). doi:10.3389/fnins.2021.630829

Palmer, C., van de Sande, C., 1995. Range of Planning in Music Performance. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 21, 947–962. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.21.5.947>

Peterson, B. S., Choi, H. A., Hao, X., Amat, J. A., Zhu, H., Whiteman, R., . . . Bansal, R. (2007). Morphologic Features of the Amygdala and Hippocampus in Children and Adults With Tourette Syndrome. *Archives of General Psychiatry*, 64(11), 1281-1291. doi:10.1001/archpsyc.64.11.1281

Repp, B.H., 1996. The Art of Inaccuracy: Why Pianists' Errors Are Difficult to Hear. *Music Percept.* 14, 161–183. <https://doi.org/10.2307/40285716>

Robertson, M.M., 2008. The prevalence and epidemiology of Gilles de la Tourette syndrome: Part 1: The epidemiological and prevalence studies. *J. Psychosom. Res.* 65, 461–472.

Ruthsatz, J., Detterman, D.K., 2003. An extraordinary memory: The case study of a musical prodigy. *Intelligence* 31, 509–518. [https://doi.org/10.1016/S0160-2896\(03\)00050-3](https://doi.org/10.1016/S0160-2896(03)00050-3)

Ruthsatz, J., Ruthsatz-Stephens, K., Ruthsatz, K., 2014. The cognitive bases of exceptional abilities in child prodigies by domain: Similarities and differences. *Intelligence* 44, 11–14. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2014.01.010>

Ruthsatz, J., Urbach, J.B., 2012. Child prodigy: A novel cognitive profile places elevated general intelligence, exceptional working memory and attention to detail at the root of prodigiousness. *Intelligence* 40, 419–426. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2012.06.002>

Scandola, M., Romano, D., 2021. Bayesian Multilevel Single Case Models using “Stan”. A new tool to study single cases in Neuropsychology. *Neuropsychologia* 156.

Scharf, J.M., Miller, L.L., Gauvin, C.A., Alabiso, J., Mathews, C.A., Ben-Shlomo, Y., 2015. Population prevalence of Tourette syndrome: A systematic review and meta-analysis. *Mov. Disord.* 30, 221–228. <https://doi.org/10.1002/mds.26089>

Servo, S., Eugenio, A., 2009. Famous people with Gilles de la Tourette syndrome? *J. Psychosom. Res.* 67, 485–490. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychores.2009.07.003>

Sloboda, J., 2004. Immediate Recall of Melodies, in: *Exploring the Musical Mind*. Oxford University Press, Oxford. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198530121.003.0004>

Sloboda, J.A., 1986. *The Musical Mind: The Cognitive Psychology of Music*. Oxford University Press., Oxford, England. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198521280.001.0001>

Sloboda, J.A., 1976. Visual perception of musical notation: registering pitch symbols in memory. *Q. J. Exp. Psychol.* 28, 1–16. <https://doi.org/10.1080/14640747608400532>

Sloboda, J.A., Hermelin, B., O'Connor, N., 1985. An Exceptional Musical Memory. *Music Percept. An Interdiscip. J.* 3, 155–169. <https://doi.org/10.2307/40285330>

Treffert, D.A., 2009. The savant syndrome: an extraordinary condition. A synopsis: past, present, future. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 364, 1351–1357. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0326>

Ullén, F., de Manzano, Ö., Mosing, M.A., Ullén, F., de Manzano, Ö., Mosing, M.A., 2019. Neural Mechanisms of Expertise. *Oxford Handb. Expert.* 1–24. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780198795872.013.6>

Wallentin, M., Nielsen, A.H., Friis-Olivarius, M., Vuust, C., Vuust, P., 2010. The Musical Ear Test, a new reliable test for measuring musical competence. *Learn. Individ. Differ.* 20, 188–196. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2010.02.004>

Wechsler, D., 2008. Wechsler adult intelligence scale—Fourth Edition (WAIS—IV). San Antonio, TX NCS Pearson 22, 498.

Wechsler, D., 2001. Echelle clinique de memoire de Weschler MEM III (WMS-III). Les Ed. du Cent. Psychol. Appl. Paris.

Worbe, Y., Gerardin, E., Hartmann, A., Valabrégue, R., Chupin, M., Tremblay, L., . . . Lehéricy, S. (2010). Distinct structural changes underpin clinical phenotypes in patients with Gilles de la Tourette syndrome. *Brain*, 133(12), 3649-3660. doi:10.1093/brain/awq293

Winner, E., 2018. How art works: A psychological exploration. Oxford University Press, USA.

Winner, E., 2000. The origins and ends of giftedness. *Am. Psychol.* 55, 159–169. <https://doi.org/10.1037//0003-066X.55.1.159>

Zendel, B. R., Willoughby, K. A., & Rovet, J. F. (2013). Neuroplastic effects of music lessons on hippocampal volume in children with congenital hypothyroidism. *Neuroreport*, 24(17), 947-950. doi:10.1097/wnr.0000000000000031

Appendix A

Questionnaire filled by the judges for the performances quality assessment:

The excerpt is pleasing to listen to:

Not pleasing at all ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ *Extremely pleasing*

The musician is hesitant (e.g. gets over parts, takes long breaks):

Not at all hesitant ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ *Extremely hesitant*

The musician seems to master the piece (e.g. He could play it in concert):

Does not master the piece at all ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ *Excellent mastery of the piece*

The piece's interpretation is expressive:

Not at all expressive ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ *Extremely expressive*

The musician shows a stability in its tempo and rhythm execution:

Not at all stable ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ *Extremely stable*

Chapitre III – Discussion générale

Rappel des objectifs

L'objectif général de la présente thèse était d'identifier les caractéristiques psychologiques et cognitives qui distinguent les musiciens précocement exceptionnels. Les prodiges étudiés ici ont été identifiés comme tels en s'étant démarqués par un haut niveau de performance (ex. : gagner un premier prix à un concours national ou international, ou plusieurs prix régionaux) ou une reconnaissance spéciale de leur talent (ex. apparition à la télévision ou dans d'autres médias, invitation à jouer avec un orchestre), et ce avant l'âge de 14 ans.

La première étude avait comme but d'identifier les facteurs psychologiques qui caractérisent les prodiges musicaux. Pour ce faire, nous avons utilisé une variété de tâches mesurant la personnalité, les traits autistiques, la récompense associée à la musique, la motivation, le flow, et les habiletés intellectuelles. Comme on sait que l'expérience musicale ainsi que l'âge auquel celle-ci commence sont associés à plusieurs de ces éléments, le groupe de 19 musiciens précocement exceptionnels a été comparé à trois groupes contrôles. Les groupes contrôles étaient constitués de deux groupes de musiciens expérimentés et appariés aux prodiges en termes de sexe, âge et années d'expérience musicale, et ayant commencé à jouer de la musique en même temps ($N = 16$) ou plus tard ($N = 19$), et d'un groupe de non musiciens ($N = 16$) appariés en sexe, âge, et nombre d'années d'éducation. Les résultats de cette étude montrent que les prodiges ne se distinguent pas des autres groupes de participants en termes d'habiletés intellectuelles, de traits de personnalité, de traits autistiques, ou de récompense associée à la musique. Toutefois, les prodiges pratiquent en moyenne davantage que les autres musiciens entre l'âge de 6 et 14 ans, et ils expérimentent davantage de flow lorsqu'ils pratiquent leur instrument. Ils ont également plus souvent tendance à rapporter qu'ils ont commencé à jouer de leur instrument pour des motivations

externes (ex. c'était l'idée de leurs parents) comparativement aux musiciens ayant commencé à jouer plus tard.

La seconde étude visait à mesurer de manière empirique la capacité d'un musicien prodige à apprendre une nouvelle pièce plus rapidement que les autres, et le cas échéant, à identifier des facteurs neurocognitifs ayant pu contribuer à cet avantage. À cette fin, le guitariste virtuose, par ailleurs atteint d'un syndrome de Gilles de la Tourette et anciennement violoniste précocement exceptionnel, a été comparé à trois autres guitaristes d'une expérience comparable à une tâche d'apprentissage d'une nouvelle pièce à la guitare. Il a également été comparé à un échantillon contrôle de 15 musiciens expérimentés dans une variété de tâches d'habiletés musicales, de mémoire et d'habiletés intellectuelles. La structure et le fonctionnement du cerveau du guitariste virtuose ont été comparés à ceux de l'échantillon contrôle. Les résultats indiquent que le guitariste virtuose apprend effectivement plus rapidement une nouvelle pièce que ses pairs, et que cette vitesse ne se fait pas au détriment de la musicalité ; au contraire. Non seulement le virtuose a-t-il appris davantage de notes, il a également joué avec une plus grande musicalité telle que jugée par deux experts. Par ailleurs, malgré des habiletés intellectuelles qui ne se démarquent pas des autres musiciens, le virtuose se démarque par une mémoire de travail exceptionnelle, autant dans les modalités auditivo-verbale que visuo-spatiale. La structure de son cerveau apparaît avoir été façonnée à la fois par le syndrome de Gilles de la Tourette et de la pratique musicale, mais aucune anomalie majeure n'est remarquée. Des résultats indiquent la possibilité d'un lien entre l'anatomie cérébrale et la propension à être dans un état de flow, mais cette piste requiert davantage d'investigation.

L'objectif de la présente discussion est d'aborder les résultats obtenus dans ces études en les intégrant à la littérature existante et d'offrir certaines pistes de réflexions vis-à-vis de différents

thèmes importants. Les limites des études menées sont discutées, et des directions de recherche futures sont proposées.

Quels sont les ingrédients pour devenir un prodige musical ?

De manière générale, les résultats obtenus dans les articles présentés et les autres informations acquises auprès des participants indiquent qu'il n'y a pas une seule manière d'être et de devenir « prodige ». En effet, il n'y a pas d'ingrédient unique qui différencie les musiciens précocement exceptionnels des autres musiciens. Si l'on prend un exemple en particulier, comme c'est le cas dans l'article 2, certains éléments ressortent comme distinguant le prodige des autres (ex. mémoire exceptionnelle, perception musicale particulièrement développée, trouble neurodéveloppemental). Par contre, lorsque l'on combine les différents prodiges ensemble et que l'on tente d'observer des tendances, ces particularités peuvent être diluées. Nos résultats supportent plutôt les modèles multifactoriels de l'expertise (MGIM) ou du développement du talent (IMTD; Gagné & McPherson, 2016).

Nos données empiriques confirment d'abord certains résultats issus de la musicologie (McPherson, 2016). Par exemple, dans notre échantillon, l'âge d'atteinte du critère pour être considéré comme un prodige est de 10.3 ans en moyenne, ce qui se rapproche de l'âge de la performance publique calculée à l'aide de 213 rapports publiés dans la première moitié du 19^e siècle, soit 10.7 ans (Kopiez, 2011).

Les prodiges se distinguent-ils par un apprentissage plus rapide ou pratiquent-ils simplement davantage comme le prédirait la théorie de la pratique délibérée ? L'étude de cas, par la démonstration d'un apprentissage accéléré, supporte la proposition de Gagné & McPherson (2016), soit que la caractéristique distinctive des prodiges, ou au moins de *certain*s prodiges, est leur facilité ou leur vitesse d'apprentissage. Il faut aussi souligner que les prodiges ont en général

tendance à pratiquer davantage que leurs pairs à un âge déterminant pour être qualifié de prodige (6 à 14 ans). La variabilité dans la quantité de pratique est non négligeable ; environ la moitié des jeunes prodiges pratiquent énormément, tandis que l'autre moitié pratique peu ou autant que les autres musiciens de leur âge. Cette hétérogénéité se reflète aussi dans le nombre d'heures de pratique nécessaires pour atteindre le statut de prodige (2 364 heures en moyenne, allant de 187 à 7 357 heures). Ces données supportent la distinction entre l'effet intra-individuel et l'effet inter-individuel de la pratique sur l'acquisition de l'expertise (Hambrick et al., 2020). C'est-à-dire que davantage de pratique sera associée à une amélioration de la performance chez à peu près tout le monde (effet intra-individuel), mais il y aura de grandes différences dans l'impact qu'aura cette pratique chez différentes personnes, certaines progressant plus rapidement que d'autres (effet inter-individuel). Ces résultats concordent aussi avec la grande variabilité dans la quantité d'heures de pratique nécessaire pour atteindre un haut niveau d'expertise dans d'autres domaines tels que les échecs (Gobet & Campitelli, 2007). Il apparaît donc, contrairement à ce qui aurait été prédit par la théorie de la pratique délibérée (Ericsson et al., 1993), que bien qu'elle soit importante, la pratique à elle seule ne peut expliquer le phénomène des prodiges musicaux et que d'autres facteurs jouent un rôle non négligeable.

D'ailleurs, qu'est-ce qui fait en sorte que plusieurs d'entre eux pratiquent autant ? Rappelons que la pratique n'est pas un élément purement environnemental. Selon Dorothy Delay, la persévérance est une qualité importante chez un jeune musicien, c'est-à-dire la capacité à continuer malgré les difficultés rencontrées (Sand, 2005; pp. 69). Des caractéristiques personnelles telles que la motivation d'origine parentale en début de pratique, ou son effet apaisant sur les manifestations d'un trouble neurodéveloppemental (voir Article II) ressortent également comme des pistes pouvant contribuer à la pratique intensive des prodiges. La propension à expérimenter

un état de flow est également ressortie comme plus élevée chez les prodiges que chez leurs pairs ayant commencé au même âge, et particulièrement élevée chez le prodige faisant l'objet de l'étude de cas (article 2). L'état de flow inclut notamment le fait de ressentir du plaisir, et peut certainement contribuer à la motivation à pratiquer. Comme la pratique musicale est exigeante et pas nécessairement source de plaisir (Ericsson et al., 1993), surtout pour des enfants, toute variable contribuant à augmenter la motivation est pertinente dans l'étude des prodiges. De plus amples recherches au sujet du rôle de l'état de flow vis-à-vis le développement du talent seraient intéressantes.

Les prodiges sont-ils doués ?

Différentes conceptions de la douance et du talent ont vu le jour et coexistent actuellement. Elles varient dans leur niveau de restrictions, notamment de la quantité de domaines dans lequel la douance peut être exprimée (Gardner, 2011), ou du niveau d'excellence devant être atteint pour être considéré comme doué (Renzulli, 1978). Comme contribution, la présente thèse vient appuyer la distinction entre la douance intellectuelle et la douance dans un domaine particulier, ici, la musique. En effet, nous n'avons pas observé de différence significative entre le fonctionnement intellectuel des prodiges et celui de leurs contrôles musiciens et non-musiciens (article 1). Notons tout de même que la moyenne du fonctionnement intellectuel dans nos échantillons se situait dans la moyenne élevée. Il est donc probable qu'au-delà d'un certain niveau d'habiletés intellectuelles, celui-ci ait un impact négligeable sur le talent musical et la capacité à se démarquer des autres musiciens, même précocement.

Quatre prodiges dans notre échantillon ont un QI au-dessus de 130, un seuil de mesure souvent utilisé comme repère parmi d'autres pour identifier la douance intellectuelle. La majorité des prodiges ayant un QI au-dessus de 130 se sont d'ailleurs démarqués dans d'autres domaines

(académique, littérature, médecine) en plus de la musique. Ceci concorde avec certains profils de prodiges ayant été présentés par Ruthsatz et Urbach (2012), parmi lesquels un prodige musical avait des habiletés intellectuelles exceptionnelles, mais avait également montré un talent exceptionnel dans le domaine de la cuisine (QI global au 99.6^e percentile). Il est possible qu'un QI très élevé soit davantage caractéristique des personnes ayant montré un talent précoce dans plus d'un domaine d'intérêt. On a d'ailleurs suggéré que les personnes ayant un haut potentiel intellectuel seraient plus susceptibles d'exceller dans plusieurs domaines puisqu'ils traitent l'information de manière plus efficace (Sala et al., 2019; Burgoyne et al., 2016). Cette question mériterait certainement davantage d'investigation.

Dans le même ordre d'idée, Renzulli souhaite l'élargissement de la conception de la douance pour qu'elle n'inclue pas seulement le haut QI, ou la douance dans les domaines académiques, mais aussi la douance dans d'autres domaines (Renzulli, 1978). Cela implique que le terme « douance » (*giftedness*) inclurait tous ces cas de figure. Il serait toutefois important de distinguer la douance « académique » ou intellectuelle de la douance dans des domaines plus spécifiques, car comme nous l'avons démontré dans la présente thèse, il s'agit de populations différentes : les personnes douées en musique ne sont pas nécessairement des personnes douées intellectuellement. C'est d'ailleurs ce qu'avait suggéré Feldman (1993), qui affirmait que les habiletés cognitives générales comme le QI ont un rôle de support vis-à-vis le développement du talent des prodiges dans un domaine spécifique plutôt qu'un rôle central.

Bien que les aptitudes intellectuelles ne ressortent pas comme étant un trait qui distingue les prodiges des autres musiciens expérimentés, cela ne signifie pas que l'intelligence n'est pas du tout importante dans le développement d'un talent exceptionnellement précoce. En effet, le fonctionnement intellectuel global de nos participants ainsi que de celui des prodiges

précédemment étudiés dans la littérature (voir tableau I) se situe au moins dans la moyenne, et peut aller jusqu'à un niveau très supérieur à la moyenne. Une analogie peut être faite avec les joueurs professionnels de basketball. Comme Detterman (2014) l'a noté, il n'y a pas de corrélation entre la grandeur et le pointage chez les joueurs de la *National Basketball Association*, or on sait que la taille est très importante dans ce sport, puisque les joueurs sont nettement plus grands que la moyenne générale. Il est donc évident qu'un certain biais de sélection vis-à-vis la grandeur s'effectue naturellement dans ce sport. Il se pourrait que la même chose se produise chez les prodiges, c'est-à-dire qu'il se peut qu'un fonctionnement intellectuel dans la moyenne ou plus élevé soit souvent nécessaire, bien que cet aspect ne les distingue pas des autres musiciens expérimentés.

Il est possible que certaines habiletés cognitives exceptionnelles mènent parfois à une expression particulière du talent musical. Dans le cas du guitariste virtuose de l'article 2, une mémoire particulièrement développée pour le contenu visuel et mélodique lui permettrait probablement d'apprendre par cœur de nouvelles pièces avec plus d'aisance. Il serait intéressant d'explorer cette piste davantage ; par exemple, est-ce que ceux qui ont une créativité plus développée sont davantage enclins à composer ou à improviser ? Nous avons déjà vu avec les études de cas présentées en introduction que les prodiges montrent des forces dans différentes aptitudes musicales, mais celles-ci varient d'un individu à l'autre (Dalla Bella et al., 2016; Janzen et al., 2016). Au début de son chapitre sur l'intelligence musicale, Howard Gardner illustre trois types de prodiges. Le premier joue une suite de Bach pour violon solo avec une grande précision technique et avec sensibilité. Le second joue par cœur une pièce qu'il vient tout juste d'entendre pour la première fois, et le troisième joue une pièce qu'il a lui-même composée. Cette diversité illustre bien la variété des parcours et des facteurs pouvant mener un jeune à se démarquer dans le domaine de la musique.

Il peut aussi arriver qu'une interaction idiosyncratique survienne entre les manifestations d'un trouble neurodéveloppemental et le développement d'un talent musical. Par exemple, la présence de tics en lien avec un syndrome de Gilles de la Tourette interagit avec l'effet de réduction des tics que procure la pratique d'un instrument de musique. Pour deux prodiges de notre échantillon, l'interaction entre un trouble neurodéveloppemental comme le trouble du spectre de l'autisme s'est manifestée, entre autres, par un intérêt très important et spécifique à l'instrument de musique, et ce très tôt dans la vie. Les résultats décrits dans l'article 1 indiquent toutefois que les prodiges n'ont pas davantage de traits autistiques que les non-prodiges. Le trouble dans le spectre de l'autisme ne constitue donc pas une piste explicative importante du phénomène des prodiges en général, bien que ce trouble puisse être présent chez certains prodiges.

En ce qui a trait à l'oreille absolue, dans le livre *Musical Prodigies* (G. E. McPherson, 2016, pp.35), on affirme que presque tous les prodiges rapportés dans l'ouvrage avaient l'oreille absolue. On sait également que l'oreille absolue est plus souvent présente chez ceux qui commencent la musique tôt dans la vie, soit entre 3 et 5 ans (Miyazaki, 1988) ou jusqu'à 7 ans (Deutsch, Henthorn, Marvin, & Xu, 2006). Malgré que la proportion de prodiges ayant une synesthésie ou l'oreille absolue soit importante (11 prodiges sur 19), nous n'avons pas trouvé de différence significative entre les groupes (7/16 chez les *early-trained* et 5/19 chez les *late-trained*).

Les prodiges : un paradigme imparfait

Le paradigme des prodiges, bien que tout à fait intéressant, comporte ses propres limites. Par exemple, la définition des prodiges exclut les instruments qui demandent un développement physique un peu plus avancé et donc qui se commencent habituellement un peu plus tard (ex. instruments à vent, chant). La notion de prodige musical restreint ainsi le concept à des instruments pour lesquels la pratique commence habituellement très jeune, comme le piano ou le violon.

En lien avec ces musiciens qui débutent leur pratique instrumentale plus tard, il y a des indices d'un certain phénomène de « rattrapage » qui sont présents dans nos résultats. En effet, lorsqu'ils commencent à pratiquer, les musiciens qui ont un début plus tardif pratiquent autant que certains prodiges qui commencent à jouer et davantage que les musiciens non-prodiges qui ont commencé tôt la pratique de leur instrument. On peut spéculer que s'ils veulent poursuivre une carrière musicale, les musiciens qui commencent plus tardivement doivent rattraper le retard qu'ils ont accumulé afin de se distinguer des musiciens qui jouent depuis plusieurs années déjà. On peut d'ailleurs penser qu'un musicien non prodige qui persiste et qui devient un musicien tout à fait talentueux est un atout pour la société, peut-être même davantage qu'un jeune musicien qui apprend extrêmement vite mais qui cesse de s'investir plus tard. Le développement précoce d'un talent n'est pas peut-être pas nécessaire ni suffisant, pour prédire le talent à l'âge adulte. Par exemple, certains prodiges dans notre échantillon ne sont pas, à l'âge adulte, des musiciens professionnels et ont plutôt choisi une autre carrière. D'autre part, certains participants dans les groupes de musiciens qui n'ont pas d'accomplissements précoces ont fait carrière en musique. Ceci rappelle le parcours de musiciens célèbres tels que Louis Armstrong, qui n'a pourtant pu commencer à pratiquer sérieusement qu'à l'âge de 17 ans faute de ressources (Williamon & Valentine, 2000). Il est d'ailleurs possible que certains de nos participants soient des prodiges en « dormance », c'est-à-dire qu'ils aient toutes les caractéristiques personnelles qui auraient été nécessaires pour devenir prodiges, mais qui n'ont peut-être pas reçu les opportunités de développer ce talent. Rappelons tout de même que le phénomène des prodiges est rare, et qu'il est peu probable que la présence de prodiges en « dormance » ait influencé de manière importante nos résultats.

La notion de privilège est importante à soulever ici. Pour développer les habiletés spécifiques à leur instrument, souvent des instruments de musique classique, les jeunes doivent

avoir accès à ces instruments, ce qui n'est malheureusement pas le cas de l'ensemble de la population. C'est évidemment une question complexe et qui n'est pas dépourvue de circularité, mais il est néanmoins important de le nommer. Ces effets sont bien identifiés dans les modèles tels que le MGIM ; les gènes, l'environnement ainsi que leur corrélation et leur interaction agissent sur l'ensemble des autres facteurs menant au développement de l'expertise. Il a d'ailleurs été montré qu'un environnement musicalement enrichi amplifie les différences individuelles et amplifie l'impact des gènes, c'est-à-dire qu'un environnement enrichi permettrait à ceux qui en ont les prédispositions de développer leur talent (Wesseldijk, Mosing, & Ullén, 2019). Ces résultats font écho à ce qui a été observé pour le QI (Tucker-Drob & Bates, 2015; Turkheimer, Haley, Waldron, D'Onofrio, & Gottesman, 2003).

Attention aux prodiges

Les prodiges sont-ils heureux? Notre société tend à valoriser la performance, et les enfants peuvent en subir une certaine pression, que celle-ci soit explicite ou plus implicite. Les prodiges dans notre étude sont plus nombreux que les autres à rapporter avoir commencé leur pratique musicale parce que c'était l'idée de leurs parents. En entrevue, certains ont rapporté avoir été forcés à pratiquer lorsqu'ils étaient jeunes, avoir cessé les compétitions ou s'être désinscrit d'une école prestigieuse à cause de la pression et de l'anxiété qui étaient trop fortes. Une experte consultée à ce sujet nous a d'ailleurs partagé que l'étiquette de prodige peut avoir un impact sur le développement du musicien, autant du point de vue individuel que musical et artistique. Gagner un prestigieux concours trop tôt pourrait ainsi être une malchance pour un musicien qui n'est pas psychologiquement prêt. Car on n'est par définition prodige que lorsqu'on est jeune, et le musicien doit ensuite évoluer en dehors de ce statut spécial s'il veut poursuivre sa carrière musicale. Certains le font certainement avec brio, mais la transition peut être plus difficile pour d'autres.

La question est certainement complexe et appelle à la nuance. Certaines familles nous ont partagé une passion intense dès l'âge de deux ans, et leur passion ne s'est jusqu'alors jamais estompée. D'autres considèrent que leur parcours, bien que parfois exigeant, leur a permis d'apprendre à travailler fort, et que cela leur sera utile dans leur vie future, peu importe le domaine dans lequel ils se dirigeront.

Il apparaît important de laisser le temps à l'enfant de décider de ce qu'il souhaite faire de ce talent et de privilégier son bien-être. L'objectif étant de permettre à ces enfants de devenir des musiciens, et plus généralement des adultes, heureux et épanouis.

Limites et pistes futures

La présente thèse et les études qui la constituent comportent certaines limites. Premièrement, il s'agit d'un devis transversal, par opposition à un devis longitudinal, qui suivrait par exemple des jeunes au cours de leur développement. En étudiant les prodiges après qu'ils aient répondu aux critères de la définition et même lorsque ceux-ci sont adultes, on étudie « ce qui est » et l'on tente de découvrir ce qui les distingue, ce qui a mené ces personnes à devenir des experts aussi précoces, un peu à la manière du « reverse engineering » (Plomin, Shakeshaft, McMillan, et al., 2014). Cette méthodologie s'oppose par exemple à celles dans lesquelles on étudierait de grandes cohortes de débutants et dans lesquelles on mesurerait la progression des jeunes musiciens ainsi que ce qui les caractérise. De telles études longitudinales permettraient de mesurer des éléments qui caractérisent le développement des prodiges avant (les prédispositions) ainsi que pendant leur évolution et qui les distinguent des autres, et non pas seulement les caractéristiques plus permanentes qui perdurent jusqu'à l'âge adulte. On pourrait ainsi mieux déterminer s'il existe des indices très précoces du talent musical, et s'ils existent, dans quelle mesure ils ont un pouvoir prédictif pertinent, ou significatif. Toutefois, la quantité de ressources nécessaires pour mener des

études longitudinales auprès de grands échantillons est prohibitive. Un projet portant sur les prodiges pourrait plus réalistement s'inscrire dans un projet plus large avec des collaborateurs.

Deuxièmement, les données présentées dans la présente thèse incluent plusieurs mesures auto-rapportées ainsi que certaines mesures rétrospectives (ex. la quantité de pratique estimée à chaque année). Une de ces mesures auto-rapportées est la propension à expérimenter un état de flow lors de la pratique de l'instrument, qui a été mesurée à l'aide du *Dispositional Flow Scale 2* (Jackson et al., 2004). On demandait alors aux participants de remplir le questionnaire en pensant aux moments où ils pratiquaient leur instrument. Or, des chercheurs ont identifié des corrélats physiologiques de l'état de flow (Harmat et al., 2015). L'utilisation de ces mesures physiologiques, par exemple pendant une période de pratique instrumentale, pourrait nous informer de manière plus directe et objective sur le rôle du flow dans le développement de l'expertise des prodiges.

Troisièmement, les données d'imagerie cérébrale gagneraient à être effectuées auprès d'un plus grand nombre de participants. Notamment, des résultats préliminaires intéressants concernant l'épaisseur corticale et le flow sont rapportés. Toutefois, la mesure de flow n'avait pas pu être mesurée auprès de tous les musiciens de l'échantillon, et les liens entre les régions identifiées comme ayant une plus grande épaisseur corticale chez le prodige (isthmus du cortex cingulaire gauche) et le flow ne sont pas documentés dans la littérature, ce qui appelle à la nuance. Une étude comparant les données de structure et de connectivité cérébrale chez les prodiges et leurs contrôles serait une première, et pourrait permettre d'identifier des prédispositions cérébrales au talent exceptionnel. En effet, nous avons montré que les prodiges sont caractérisés par une pratique plus intensive à des moments du développement où la plasticité du cerveau est élevée (Herholz & Zatorre, 2012), et qu'ils peuvent apprendre une pièce plus rapidement que leurs pairs, du moins dans certains cas (article 2). Nous savons par ailleurs que l'activité dans certaines régions du

cerveau impliquées dans l'encodage auditif et le contrôle moteur prédit la réussite de l'apprentissage d'un nouvel instrument (Wollman, Penhune, Segado, Carpentier, & Zatorre, 2018). On pourrait donc s'attendre à ce que les prodiges montrent des différences innées dans le degré d'activation de ces réseaux neuronaux. Ces prédispositions pourraient être aussi être amplifiées par la pratique précoce et intensive dont ils font preuve. Il serait certainement intéressant d'investiguer cet aspect dans de futures recherches sur les prodiges musicaux.

Conclusion

La présente thèse livre une contribution unique à la recherche moderne sur les prodiges musicaux. Elle contient la plus grande étude concernant les prodiges musicaux, et est la seule à comparer un groupe de prodiges musicaux à des groupes contrôles. Elle contient également la première étude à mesurer la vitesse d'apprentissage d'une nouvelle pièce complète chez un prodige comparativement à ses pairs. La présente thèse contribue à la compréhension de la distinction entre la douance musicale et la douance intellectuelle. En effet, les prodiges n'ont pas un QI plus élevé que leurs pairs musiciens ou non musiciens. Elle montre aussi qu'une pratique intensive en bas âge caractérise généralement les prodiges musicaux. Un état de flow lors de la pratique, et une motivation davantage parentale lors du début de la pratique sont des éléments qui semblent contribuer au phénomène. Certains prodiges ont reçu un diagnostic de trouble neurodéveloppemental (TSA, SGT), mais les traits autistiques ne sont pas plus élevés chez les prodiges que chez les autres musiciens. Le phénomène des prodiges est certainement complexe et ne relève pas de la présence d'un « ingrédient » spécial. Il s'agirait plutôt d'un phénomène caractérisé par une diversité de trajectoires développementales et qui s'inscrit le mieux dans les modèles multifactoriels du développement de l'expertise. La présente thèse contribue aux

connaissances scientifiques concernant les prodiges musicaux et plus généralement le développement du talent.

Bibliographie

- Austin, E. J. (2005). Personality correlates of the broader autism phenotype as assessed by the Autism Spectrum Quotient (AQ). *Personality and Individual Differences*, 38(2), 451–460. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2004.04.022>
- Baumgarten, F. (1930). *Wunderkinder. Psychologische Untersuchungen. VIII.*
- Bigand, E., & Tillmann, B. (2022). Near and far transfer: Is music special? *Memory and Cognition*, 50(2), 339–347. <https://doi.org/10.3758/s13421-021-01226-6>
- Burgoyne, A. P., Harris, L. J., & Hambrick, D. Z. (2019). Predicting piano skill acquisition in beginners: The role of general intelligence, music aptitude, and mindset. *Intelligence*, 76(August), 101383. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2019.101383>
- Burgoyne, A. P., Sala, G., Gobet, F., Macnamara, B. N., Campitelli, G., & Hambrick, D. Z. (2016). The relationship between cognitive ability and chess skill: A comprehensive meta-analysis. *Intelligence*, 59, 72–83. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2016.08.002>
- Butkovic, A., Ullén, F., & Mosing, M. A. (2015). Personality related traits as predictors of music practice: Underlying environmental and genetic influences. *Personality and Individual Differences*, 74, 133–138. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2014.10.006>
- Cavanna, A. E., Robertson, M. M., & Critchley, H. D. (2007). Schizotypal personality traits in Gilles de la Tourette syndrome. *Acta Neurologica Scandinavica*, 116(6), 385–391. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0404.2007.00879.x>
- Chaffin, R., Lisboa, T., Logan, T., & Begosh, K. T. (2010). Preparing for memorized cello performance: the role of performance cues. *Psychology of Music*, 38(1), 3–30. <https://doi.org/10.1177/0305735608100377>
- Chaffin, R., & Logan, T. (2006). Practicing perfection: How concert soloists prepare for performance. *Advances in Cognitive Psychology*, 2(2), 113–130. <https://doi.org/10.2478/v10053-008-0050-z>
- Comeau, G., Huta, V., & Liu, Y. (2015). Work ethic, motivation, and parental influences in Chinese

- and North American children learning to play the piano. *International Journal of Music Education*, 33(2), 181–194. <https://doi.org/10.1177/0255761413516062>
- Comeau, G., Lu, Y., Swirp, M., & Mielke, S. (2018). Measuring the musical skills of a prodigy: A case study. *Intelligence*, 66(November), 84–97. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2017.11.008>
- Comeau, G., Vuvan, D. T., Picard-Deland, C., & Peretz, I. (2017). Can you tell a prodigy from a professional musician? *Music Perception*, 35(2), 200–210. <https://doi.org/10.1525/MP.2017.35.2.200>
- Corrigall, K. A., Schellenberg, E. G., & Misura, N. M. (2013). Music Training, Cognition, and Personality. *Frontiers in Psychology*, 4(April). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00222>
- Crawford, J. R., & Garthwaite, P. H. (2002). Investigation of the single case in neuropsychology: Confidence limits on the abnormality of test scores and test score differences. *Neuropsychologia*, 40(8), 1196–1208. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(01\)00224-X](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(01)00224-X)
- Crawford, J. R., & Howell, D. C. (1998). Comparing an individual's test score against norms derived from small samples. *Clinical Neuropsychologist*, 12(4), 482–486. <https://doi.org/10.1076/clin.12.4.482.7241>
- Crawford, John R., Garthwaite, P. H., & Porter, S. (2010). Point and interval estimates of effect sizes for the case-controls design in neuropsychology: Rationale, methods, implementations, and proposed reporting standards. *Cognitive Neuropsychology*, 27(3), 245–260. <https://doi.org/10.1080/02643294.2010.513967>
- Csikszentmihalyi, M. (1990). *Flow: The psychology of optimal experience*. Harper & Row New York.
- Dalla Bella, S., Sowi, J., Farrugia, N., & Berkowska, M. (2016). Igor : A case study of a child drummer prodigy Igor : A case study of a child drummer prodigy. In G. E. McPherson (Ed.), *Musical prodigies: Interpretations from psychology, education, musicology, and ethnomusicology* (pp. 391–408). Oxford: Oxford University Press.
- de Manzano, Ö., Theorell, T., Harmat, L., & Ullén, F. (2010). The Psychophysiology of Flow During Piano Playing. *Emotion*, 10(3), 301–311. <https://doi.org/10.1037/a0018432>

- Detterman, D. K. (2014). Introduction to the intelligence special issue on the development of expertise: Is ability necessary? *Intelligence*, 45(1), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2014.02.004>
- Deutsch, D., Henthorn, T., Marvin, E., & Xu, H. (2006). Absolute pitch among American and Chinese conservatory students: Prevalence differences, and evidence for a speech-related critical period. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 119(2), 719. <https://doi.org/10.1121/1.2151799>
- dos Santos-Luiz, C., Mónico, L. S. M., Almeida, L. S., & Coimbra, D. (2016). Exploring the long-term associations between adolescents' music training and academic achievement. *Musicae Scientiae*, 20(4), 512–527. <https://doi.org/10.1177/1029864915623613>
- Duke, R. A., Simmons, A. L., & Cash, C. D. (2009). It's not how much; It's how: Characteristics of practice behavior and retention of performance skills. *Journal of Research in Music Education*, 56(4), 310–321. <https://doi.org/10.1177/0022429408328851>
- Ericsson, K. A., Krampe, R. T., & Tesch-Römer, C. (1993). The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological Review*, 100(3), 363–406. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.100.3.363>
- Evans, P., & Bonneville-Roussy, A. (2016). Self-determined motivation for practice in university music students. *Psychology of Music*, 44(5), 1095–1110. <https://doi.org/10.1177/0305735615610926>
- Feldman, D. H. (1993). Prodigies : A Distinctive Form of Giftedness. *Gifted Child Quarterly*, 37(4), 188–193.
- Feldman, D. H., & Goldsmith, L. T. (1986). *Nature's gambit*. Basic Books.
- Feldman, D. H., & Morelock, M. J. (2020). Prodigies and Savants. In R. Sternberg (Ed.), *The Cambridge Handbook of Intelligence* (pp. 258–290). <https://doi.org/doi:10.1017/9781108770422.013>
- Gagné, F. (2013). The DMGT: Changes Within, Beneath, and Beyond. *Talent Development and Excellence*, 5(1), 5–19.

- Gagné, F., & McPherson, G. E. (2016). Analyzing musical prodigiousness using Gagné's Integrative Model of Talent Development. In G. E. McPherson (Ed.), *Musical prodigies: Interpretations from psychology, education, musicology, and ethnomusicology* (Vol. 1, pp. 3–114). Oxford: Oxford University Press.
- Gardner, H. E. (2011). *Frames of mind: The theory of multiple intelligences*. Basic books.
- Gobet, F., & Campitelli, G. (2007). The role of domain-specific practice, handedness, and starting age in chess. *Developmental Psychology*, *43*(1), 159–172. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.43.1.159>
- Gordon, E. (1986). *Intermediate measures of music audiation*. GIA Publications.
- Guay, F., Mageau, G. A., & Vallerand, R. J. (2003). On the hierarchical structure of self-determined motivation: A test of top-down, bottom-up, reciprocal, and horizontal effects. *Personality and Social Psychology Bulletin*, *29*(8), 992–1004. <https://doi.org/10.1177/0146167203253297>
- Hambrick, D. Z., Campitelli, G., & Macnamara, B. N. (2018). *The science of expertise*. New York, NY: Routledge.
- Hambrick, D. Z., Macnamara, B. N., & Oswald, F. L. (2020). Is the Deliberate Practice View Defensible? A Review of Evidence and Discussion of Issues. *Frontiers in Psychology*, *11*(August). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01134>
- Harmat, L., de Manzano, Ö., Theorell, T., Högman, L., Fischer, H., & Ullén, F. (2015). Physiological correlates of the flow experience during computer game playing. *International Journal of Psychophysiology*, *97*(1), 1–7.
- Harris, D. J., Vine, S. J., & Wilson, M. R. (2017). Is flow really effortless? The complex role of effortful attention. *Sport, Exercise, and Performance Psychology*, *6*(1), 103–114. <https://doi.org/10.1037/spy0000083>
- Herholz, S. C., & Zatorre, R. J. (2012). Musical Training as a Framework for Brain Plasticity : *Neuron*, *76*(3), 486–502. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.10.011>
- Jackson, S. A., Eklund, R., & Leatherman, G. (2004). *The flow scales manual*. Publishers Graphics.
- Janzen, T. B., Ammirante, P., & Thompson, W. F. (2016). Development of timing skills. In G. E.

- McPherson (Ed.), *Musical prodigies: Interpretations from psychology, education, musicology, and ethnomusicology* (pp. 378–390).
<https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199685851.003.0016>
- Jenkins, R. E., Tsermentseli, S., Monks, C. P., Robertson, D. J., Stevenage, S. V., Symons, A. E., & Davis, J. P. (2021). Are super-face-recognisers also super-voice-recognisers? Evidence from cross-modal identification tasks. *Applied Cognitive Psychology, 35*(3), 590–605.
<https://doi.org/10.1002/acp.3813>
- Kopiez, R. (2011). The musical child prodigy (wunderkind) in music history: A historiometric analysis. *Music and the Mind: Essays in Honour of John Sloboda, 225–236*.
- Kragness, H. E., Swaminathan, S., Cirelli, L. K., & Schellenberg, E. G. (2021). Individual differences in musical ability are stable over time in childhood. *Developmental Science, 24*(4).
<https://doi.org/10.1111/desc.13081>
- LePort, A. K. R., Stark, S. M., McGaugh, J. L., & Stark, C. E. L. (2017). A cognitive assessment of highly superior autobiographical memory. *Memory, 25*(2), 276–288.
<https://doi.org/10.1080/09658211.2016.1160126>
- Lisboa, T., Demos, A. P., & Chaffin, R. (2018). Training thought and action for virtuoso performance. *Musicae Scientiae, 22*(4), 519–538. <https://doi.org/10.1177/1029864918782350>
- Macnamara, B. N., Hambrick, D. Z., & Oswald, F. L. (2014). Deliberate Practice and Performance in Music, Games, Sports, Education, and Professions: A Meta-Analysis. *Psychological Science, 25*(8), 1608–1618. <https://doi.org/10.1177/0956797614535810>
- Macnamara, B. N., Hambrick, D. Z., & Oswald, F. L. (2018). Corrigendum: deliberate practice and performance in music, games, sports, education, and professions: a meta-analysis. *Psychological Science, 29*(7), 1202–1204. <https://doi.org/10.1177/0956797618769891>
- Marin, M. M., & Bhattacharya, J. (2013). Getting into the musical zone: Trait emotional intelligence and amount of practice predict flow in pianists. *Frontiers in Psychology, 4*(NOV), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00853>
- Marion-St-Onge, C., Weiss, M. W., Sharda, M., & Peretz, I. (2020). What makes musical prodigies? *Frontiers in Psychology, 11*, 3244.

- McPherson, G. E. (2016). *Musical prodigies: Interpretations from psychology, education, musicology, and ethnomusicology*. Oxford University Press.
- McPherson, G., & Hallam, S. (2009). Musical potential. *The Oxford Handbook of Music Psychology*, 255–264.
- Merrett, D. L., Peretz, I., & Wilson, S. J. (2013). Moderating variables of music training-induced neuroplasticity: A review and discussion. *Frontiers in Psychology*, Vol. 4. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00606>
- Miyazaki, K. (1988). Musical pitch identification by absolute pitch possessors. *Perception & Psychophysics*, 44(6), 501–512.
- Mosing, M. A., Madison, G., Pedersen, N. L., Kuja-halkola, R., & Ullén, F. (2014). *Practice Does Not Make Perfect: No Causal Effect of Music Practice on Music Ability*. <https://doi.org/10.1177/0956797614541990>
- Pausch, V., Düvel, N., & Kopiez, R. (2022). You can tell a prodigy from A professional musician: A replication of Comeau et al.'s (2017) study. *Music Perception*, 40(1), 39–54. <https://doi.org/https://doi.org/10.1525/MP.2022.40.1.39>
- Peifer, C., Schulz, A., Schächinger, H., Baumann, N., & Antoni, C. H. (2014). The relation of flow-experience and physiological arousal under stress - Can u shape it? *Journal of Experimental Social Psychology*, 53, 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.jesp.2014.01.009>
- Peretz, I. (2016). Neurobiology of Congenital Amusia. *Trends in Cognitive Sciences*, 20(11), 857–867. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2016.09.002>
- Plomin, R., Shakeshaft, N. G., Mcmillan, A., & Trzaskowski, M. (2014). Nature, nurture, and expertise: RESPONSE to Ericsson. *Intelligence*, 45(1), 115–117. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2014.01.003>
- Plomin, R., Shakeshaft, N. G., McMillan, A., & Trzaskowski, M. (2014). Nature, nurture, and expertise. *Intelligence*, 45(1), 46–59. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2013.06.008>
- Renzulli, J. S. (1978). What makes giftedness?: A reexamination of the definition of the gifted and talented. *Phi Delta Kappan*, 60(3), 180–184.

- Révész, G. (1925). *The psychology of a musical prodigy*. New York: Harcourt Brace.
- Ruthsatz, J., & Detterman, D. K. (2003). An extraordinary memory: The case study of a musical prodigy. *Intelligence*, *31*(6), 509–518. [https://doi.org/10.1016/S0160-2896\(03\)00050-3](https://doi.org/10.1016/S0160-2896(03)00050-3)
- Ruthsatz, J., Petrill, S. A., Li, N., Wolock, S. L., & Bartlett, C. W. (2015). Molecular genetic evidence for shared etiology of autism and prodigy. *Human Heredity*, *79*(2), 53–59. <https://doi.org/10.1159/000373890>
- Ruthsatz, J., Ruthsatz-Stephens, K., & Ruthsatz, K. (2014). The cognitive bases of exceptional abilities in child prodigies by domain: Similarities and differences. *Intelligence*, *44*(1), 11–14. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2014.01.010>
- Ruthsatz, J., & Urbach, J. B. (2012). Child prodigy: A novel cognitive profile places elevated general intelligence, exceptional working memory and attention to detail at the root of prodigiousness. *Intelligence*, *40*(5), 419–426. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2012.06.002>
- Ryan, R. M., & Deci, E. L. (2000). Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being. *American Psychologist*, *55*(1), 68.
- Sala, G., Aksayli, N. D., Tatlidil, K. S., Tatsumi, T., Gondo, Y., & Gobet, F. (2019). Near and Far Transfer in Cognitive Training: A Second-Order Meta-Analysis. *Collabra: Psychology*, *5*(1). <https://doi.org/10.1525/COLLABRA.203>
- Sala, G., & Gobet, F. (2020). Cognitive and academic benefits of music training with children: A multilevel meta-analysis. *Memory & Cognition*. <https://doi.org/10.3758/s13421-020-01060-2>
- Sand, B. L. (2005). *Teaching genius: Dorothy DeLay and the making of a musician*. Hal Leonard Corporation.
- Schellenberg, E. G. (2006). Long-term positive associations between music lessons and IQ. *Journal of Educational Psychology*, *98*(2), 457–468. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.98.2.457>
- Sloboda, J. A., Davidson, J. W., Howe, M. J. A., & Moore, D. G. (1996). The role of practice in the development of performing musicians. *British Journal of Psychology*, *87*(2), 287–309. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1996.tb02591.x>

- Sloboda, J. A., Hermelin, B., & O'Connor, N. (1985). An Exceptional Musical Memory. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 3(2), 155–169. <https://doi.org/10.2307/40285330>
- Soderstrom, H., & Gillberg, C. (2002). *Temperament and character in adults with Asperger*.
- Solomon, A. (2012). *How Do You Raise a Prodigy?* 1–10.
- Stedman, L. M. (1923). *Education of gifted children*. World Book Company.
- Swaminathan, S., & Schellenberg, E. G. (2019). Music Training and Cognitive Abilities: Associations, Causes, and Consequences. In *The Oxford Handbook of Music and the Brain*. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780198804123.013.26>
- Swaminathan, S., Schellenberg, E. G., & Khalil, S. (2017). Revisiting the association between music lessons and intelligence: Training effects or music aptitude? *Intelligence*, 62, 119–124. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2017.03.005>
- Tormé, M. (1991). *Traps, the drum wonder: The life of Buddy Rich*. New York: Oxford University Press.
- Tucker-Drob, E. M., & Bates, T. C. (2015). Large Cross-National Differences in Gene × Socioeconomic Status Interaction on Intelligence. *Psychological Science*, 27(2), 138–149. <https://doi.org/10.1177/0956797615612727>
- Turkheimer, E., Haley, A., Waldron, M., D'Onofrio, B., & Gottesman, I. I. (2003). Socioeconomic Status Modifies Heritability of IQ in Young Children. *Psychological Science*, 14(6), 623–628. https://doi.org/10.1046/j.0956-7976.2003.psci_1475.x
- Ullén, F., Hambrick, D. Z., & Mosing, M. A. (2016). Rethinking Expertise: A Multifactorial Gene–Environment Interaction Model of Expert Performance. *Psychological Bulletin*, 142(4), 427–446. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1037/bul0000033>
- Ullén, Fredrik, de Manzano, Ö., Almeida, R., Magnusson, P. K. E., Pedersen, N. L., Nakamura, J., ... Madison, G. (2012). Proneness for psychological flow in everyday life: Associations with personality and intelligence. *Personality and Individual Differences*, 52(2), 167–172. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2011.10.003>
- Ullén, Fredrik, Mosing, M. A., & Hambrick, D. Z. (2017). The multifactorial gene-environment

- interaction model (MGIM) of expert performance. *The Science of Expertise: Behavioral, Neural, and Genetic Approaches to Complex Skill*, 365–375. <https://doi.org/10.4324/9781315113371>
- Wakabayashi, A., Baron-Cohen, S., & Wheelwright, S. (2006). Are autistic traits an independent personality dimension? A study of the Autism-Spectrum Quotient (AQ) and the NEO-PI-R. *Personality and Individual Differences*, 41(5), 873–883. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2006.04.003>
- Wallentin, M., Nielsen, A. H., Friis-Olivarius, M., Vuust, C., & Vuust, P. (2010). The Musical Ear Test, a new reliable test for measuring musical competence. *Learning and Individual Differences*, 20(3), 188–196. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2010.02.004>
- Wechsler, D. (1999). Manual for the Wechsler abbreviated intelligence scale (WASI). *San Antonio, TX: The Psychological Corporation*.
- Wesseldijk, L. W., Mosing, M. A., & Ullén, F. (2019). Gene-environment interaction in expertise: The importance of childhood environment for musical achievement. *Developmental Psychology*, 55(7), 1473–1479. <https://doi.org/10.1037/dev0000726>
- Williamon, A., & Valentine, E. (2000). Quantity and quality of musical practice as predictors of performance quality. *British Journal of Psychology*, 91(3), 353–376. <https://doi.org/10.1348/000712600161871>
- Winner, E. (2000). The origins and ends of giftedness. *American Psychologist*, 55(1), 159–169. <https://doi.org/10.1037//0003-066X.55.1.159>
- Wollman, I., Penhune, V., Segado, M., Carpentier, T., & Zatorre, R. J. (2018). Neural network retuning and neural predictors of learning success associated with cello training [Neuroscience]. *Pnas*. <https://doi.org/10.1073/pnas.1721414115>
- Young, A. W., & Noyes, E. (2019). We need to talk about super-recognizers Invited commentary on: Ramon, M., Bobak, AK, & White, D. Super-recognizers: From the lab to the world and back again. *British Journal of Psychology*. *British Journal of Psychology*, 110(3), 492–494.

