

INFLUENCE DE L'APPRENTISSAGE DE LA MUSIQUE SUR LA PERCEPTION DES SYLLABES CHEZ LES ENFANTS NORMOLECTEURS ET DYSLEXIQUES

PAR

J. CHOBERT¹ & M. BESSON¹

L'EXPERTISE MUSICALE

Les musiciens constituent un modèle intéressant et pertinent pour étudier les effets de l'expertise sur la plasticité cérébrale chez l'homme [37, 58, 75 ; *pour une revue*, voir 42]. Au niveau structural, plusieurs études ont montré que différentes structures cérébrales sont généralement plus développées chez les musiciens que chez les non-musiciens [31, 32, 39, 50, 52, 76]. Ces différences anatomiques sont souvent associées à des différences fonctionnelles dans diverses tâches motrices, perceptives ou cognitives [1, 4, 5, 28, 40, 49, 65, 78, 86]. Un réseau cérébral incluant l'aire de Broca, le cortex auditif associatif et le gyrus pré-central est, par exemple, plus activé chez les musiciens pour l'écoute d'extraits correspondant à leur instrument d'expertise que pour d'autres instruments [54]. D'autres auteurs ont mis en évidence une corrélation entre l'amplitude de certaines composantes des Potentiels Evoqués (PEs) et le niveau de pratique musicale [45, 84, 85]. La composante P2m (équivalent magnétique de la P2 électrique), associée à des sons de piano, est plus ample chez les musiciens que chez les non-musiciens, reflétant ainsi la plasticité corticale induite par la pratique musicale [45, 84, 85].

Cependant, alors que de nombreuses études ont été conduites chez l'adulte, peu d'études ont eu pour but de tester les effets de l'expertise musicale chez l'enfant. Néanmoins, des différences anatomiques [77] et fonctionnelles [e.g., 40, 94] ont également été mises en évidence entre enfants musiciens et non-musiciens, démontrant ainsi des effets de plasticité cérébrale chez l'enfant.

EXPERTISE MUSICALE ET TRANSFERT D'APPRENTISSAGE DE LA MUSIQUE VERS LE LANGAGE

Bien qu'évidemment différents, la musique et le langage présentent certaines similarités intéressantes. Les deux sont des signaux auditifs qui reposent sur les mêmes paramètres acoustiques : fréquence, durée, intensité et timbre. De plus, ce sont des structures acoustiques complexes qui sont organisées selon des

¹ Institut de Neurosciences Cognitives de la Méditerranée, 31 chemin Joseph Aiguier, 13402 Cedex 20, Marseille

règles qui définissent différents niveaux d'organisation [6, 7, 66], dont le traitement pourrait, dans certains cas, impliquer des processus communs. Enfin, langage et musique reposent sur la mise en jeu de processus attentionnels, mnésiques et moteurs. L'hypothèse d'un transfert d'apprentissage de la musique vers le langage repose sur l'idée selon laquelle les musiciens seraient plus sensibles que les non-musiciens aux caractéristiques acoustiques des sons musicaux et que cette augmentation de sensibilité transférerait aux sons linguistiques.

Ainsi, plusieurs auteurs ont comparé les traitements de sons musicaux et linguistiques chez des participants musiciens et non-musiciens. Au niveau sous-cortical, Musacchia, Sams, Skoe, & Kraus (2007) [59] ont enregistré les Potentiels Evoqués du Tronc Cérébral (PETCs) à la présentation d'un stimulus musical, la note de musique "sol" et d'un stimulus linguistique, la syllabe "Ba". Les résultats ont montré que les musiciens encodent les caractéristiques acoustiques de ces stimuli, musicaux et linguistiques, de manière plus ample et plus fidèle que les non-musiciens. De plus, ce meilleur encodage de la syllabe au niveau sous-cortical était corrélé à la latence du complexe cortical P1/N1 mais aussi au nombre d'années de pratique musicale des musiciens [60]. En utilisant les méthodes comportementales et Potentiels Evoqués (PEs), Schön, Magne & Besson (2004) [79] ont comparé des adultes musiciens et non-musiciens dans une tâche de discrimination de la hauteur tonale de la dernière note de phrases mélodique et du dernier mot de phrases linguistiques. La fréquence fondamentale F0 était soit non-modifiée, soit faiblement modifiée, soit fortement modifiée et les participants devaient déterminer si la dernière note/le dernier mot de la phrase musicale/linguistique était normal ou bizarre. Les résultats ont mis en évidence une meilleure discrimination et des composantes des PEs plus précoces pour les faibles variations de hauteur chez les musiciens que chez les non-musiciens, que les phrases soient musicales ou linguistiques. Les musiciens détectent donc mieux que les non-musiciens les variations de fréquence, non seulement dans la musique mais aussi dans le langage.

Magne, Schön & Besson (2006) [53] ont, par la suite, reproduit ces résultats chez des enfants musiciens et non-musiciens. Une autre étude a été réalisée par Milovanov, Huotilainen, Esquef, Alku, Välimäki, & Tervaniemi (2009) [55] chez des enfants de 10 à 12 ans en utilisant un protocole de Mismatch Négativité (MNN), une composante qui reflèterait le traitement pré-attentif de la déviance dans une séquence de sons standards [61], afin de cerner l'influence des capacités musicales et linguistiques sur le traitement pré-attentif de la durée de stimuli musicaux (sons de violon) et linguistiques (voyelle finnoise /*ö*/). Les résultats ont montré une corrélation positive entre les aptitudes musicales et linguistiques des enfants et l'amplitude des MMNs associées aux déviants en durée, que ce soit dans un contexte musical ou linguistique, suggérant ainsi un lien étroit entre aptitudes musicales et linguistiques.

Ces différents résultats montrent un effet de l'expertise musicale sur le traitement de paramètres acoustiques dans les sons linguistiques. Cependant, à notre connaissance, aucune étude n'a eu pour but d'analyser directement les effets de l'expertise musicale sur le traitement des aspects phonologiques du langage. Les études réalisées ont permis d'établir des corrélations entre capacités musicales et phonologiques [2, 10, 11, 46]. Par exemple, Lamb & Gregory (1993) [46] ont montré que les enfants qui ont les scores les plus élevés aux tests musicaux sont également ceux qui ont les scores les plus élevés aux tests de conscience phonologique et de lecture. Les auteurs concluent que les enfants qui ont obtenu de

meilleurs résultats au test de perception musicale sont capables de décoder et de manipuler les différentes unités linguistiques (rimes, syllabes et phonèmes) avec plus de facilité que les enfants qui ont un niveau de performance moins élevé.

Le but de notre première expérience [15] était de tester l'influence de l'expertise musicale sur le traitement pré-attentif des syllabes. L'hypothèse était la suivante : les enfants musiciens devraient mieux traiter les variations de fréquence et de durée que les enfants non-musiciens. De plus, cette facilitation du traitement de la durée devrait avoir une incidence sur la sensibilité aux déviants phonologiques correspondant au délai d'établissement du voisement (Voice Onset Time, VOT). Le VOT est un paramètre phonologique qui correspond à l'intervalle entre le relâchement de l'air (i.e., l'explosion de la consonne) et le début de la vibration des cordes vocales [48]. Les variations de VOT permettent de distinguer les consonnes voisées (e.g., /b/) des consonnes non-voisées (e.g., /p/). La perception du VOT a été étudiée chez l'adulte en utilisant la MMN [e.g., 67, 88] et les résultats ont montré des MMNs d'amplitude plus petite pour les changements à l'intérieur d'une même catégorie phonémique (e.g., différents types de "Ba") que pour les changements entre 2 catégories phonémiques (e.g., entre "Ba" et "Pa"). Nous avons utilisé un protocole de "multi-feature" MMN dans lequel plusieurs types de déviants, différents du standard sur un paramètre spécifique, sont présentés dans la même séquence de sons [62] avec la syllabe "Ba" comme standard et des déviants sur 3 dimensions : fréquence de la voyelle, durée de la voyelle et VOT. De plus, pour chaque dimension, les déviants étaient acoustiquement proches ou distants du son standard (petits et grands déviants). Quatorze enfants musiciens (4 ans de pratique musicale en moyenne) et 14 enfants non-musiciens, âgés de 9 ans en moyenne, ont participé à cette étude. Les enfants avaient pour consigne d'ignorer les sons présentés dans le casque audio et de focaliser leur attention sur le film muet qui leur était présenté (écoute passive). Concernant le traitement pré-attentif de la fréquence, ni les grands déviants, ni les petits déviants n'ont suscité de MMN claire chez les enfants musiciens et non-musiciens (fig. 1), probablement car ils étaient trop proches du standard pour être détectés au niveau pré-attentif. Pour les grands et les petits déviants en durée, en accord avec les résultats de Milovanov *et al* (2009) [55] l'amplitude de la MMN était plus grande chez les musiciens que chez les non-musiciens (fig. 1), soulignant une influence positive de l'expertise musicale sur le traitement de la durée de stimuli linguistiques. Ces résultats vont dans le sens d'un traitement commun de la durée dans la musique et le langage. Concernant le traitement des déviants en VOT, les MMNs sont plus amples pour les grands déviants que pour les petits déviants chez les enfants musiciens (fig. 1). En revanche, les enfants non-musiciens ne présentent pas cet effet de taille de la déviance, et l'amplitude des MMNs aux grands et aux petits déviants sont similaires à celles des grands déviants chez les musiciens (fig. 1). Les petits déviants, qui sont associés à des MMNs de faible amplitude chez les enfants musiciens, seraient donc perçus comme des variations intra-catégories [19, 20, 88]. En revanche, les grands déviants (très proche du "Pa" sur le continuum) seraient donc traités comme des variations inter-catégorie par les enfants musiciens et les non-musiciens (MMNs de grande amplitude dans les deux groupes). Enfin, comme les petits déviants sont associés à des MMNs aussi amples que les grands déviants chez les non-musiciens, les petits déviants seraient également perçus comme des variations inter-catégories. Les enfants non-musiciens traiteraient donc tous les changements de VOT (petits ou grands) comme des changements de catégorie phonémique alors que les enfants musiciens percevraient la petite différence

entre grands et petits déviants. En augmentant la sensibilité des enfants musiciens aux caractéristiques acoustiques des sons, l'apprentissage de la musique augmenterait également leur sensibilité à la durée du voisement. Cette sensibilisation permettrait d'établir des représentations plus fines du VOT et de développer ainsi des représentations phonologiques plus fiables. Cette interprétation est en accord avec des résultats précédents, montrant une corrélation positive entre capacités musicales et phonologiques [e.g., 2, 64, 89].

Cette étude [15], basée sur la comparaison de groupes d'enfants musiciens et non-musiciens montre que les enfants musiciens, avec 4 ans d'apprentissage de la musique, traitent mieux les paramètres acoustiques et phonologiques de syllabes au niveau pré-attentif. Néanmoins, elles ne permettent pas d'établir de relation causale entre les différents paramètres (e.g., apprentissage musical et traitement des différents paramètres acoustiques et phonologiques). La question reste donc ouverte de déterminer si les différences observées entre musiciens et non-musiciens sont liées à une pratique musicale intensive ou si elles résultent de prédispositions génétiques pour la musique [70].

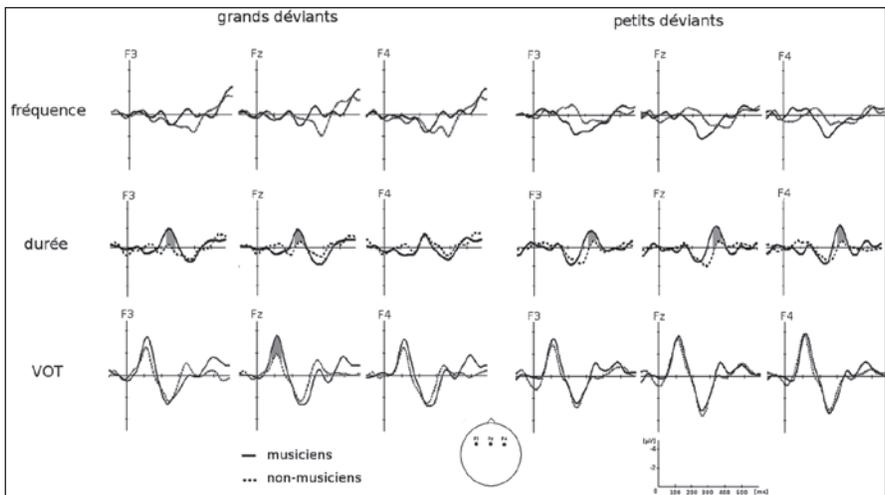


Fig. 1 : MMNs suscitées par les grands déviants (à gauche) et les petits déviants (à droite) en fréquence (en haut), en durée (au milieu) et en VOT (en bas) chez les enfants musiciens (en trait plein) et non-musiciens (en pointillés). Les rangs de latences dans lesquels les différences entre musiciens et non-musiciens sont significatives sur l'amplitude de la MMN sont représentés en gris.

PRÉDISPOSITIONS GÉNÉTIQUES OU INFLUENCE DE L'APPRENTISSAGE MUSICAL ?

Plusieurs arguments sont en faveur d'un effet de la pratique musicale. *Premièrement*, les différences anatomo-fonctionnelles liées à l'expertise musicale sont généralement corrélées avec l'âge de début de l'apprentissage [e.g., 23, 31]. *Deuxièmement*, ces différences sont directement liées au type de pratique musicale [e.g. 94]. *Troisièmement*, le nombre d'heures de pratique musicale est corrélié avec le niveau d'expertise musicale et avec l'augmentation de matière grise dans certaines régions cérébrales [e.g., 29]. *Quatrièmement*, les apprentissages musicaux courts produisent des effets comparables aux apprentissages

musicaux longs [e.g., 4]. Enfin, Norton, Winner, Cronin, Overy, Lee, & Schlaug (2005) [63], en utilisant l'IRM et l'IRMf, n'ont pas montré de différences entre les enfants qui ont commencé un apprentissage musical et les enfants qui ne pratiquent pas de musique. Ces résultats suggèrent donc que les différences observées entre enfants musiciens et non-musiciens ne résulteraient pas uniquement de prédispositions génétiques pour la musique, mais dépendraient, dans une large mesure, de l'apprentissage musical.

Toutefois, malgré ces différents arguments, la seule façon de démontrer un lien de causalité entre l'apprentissage musical et les effets d'intérêt est de conduire une étude longitudinale [e.g., 27, 35, 57]. Récemment, Hyde, Lerch, Norton *et al* (2009) [35] ont montré que 15 mois d'apprentissage musical chez des enfants de 6 ans augmentent leur niveau de performance dans des tâches de discrimination rythmique et mélodique et dans une tâche de séquençage moteur digital. De plus, ces améliorations sont corrélées avec des changements structuraux dans certaines régions cérébrales (le cortex moteur primaire, le cortex auditif droit et le corps calleux), connues pour jouer un rôle dans la pratique instrumentale et le traitement auditif chez l'adulte [e.g., 29]. Cependant, dans la mesure où plusieurs facteurs, tels que des différences préexistantes et des différences de motivation ou de stimulation cognitive entre les enfants qui suivent un apprentissage musical et ceux qui n'en suivent pas, n'étaient pas contrôlées dans ces expériences, le lien causal ne peut pas être démontré.

Enfin, Moreno, Marques, Santos, Santos, Castro, & Besson (2009) [57] ont testé l'influence d'un apprentissage musical chez des enfants de 8 ans en s'assurant qu'il n'y avait pas de différences entre les groupes d'enfants avant apprentissage [72] et que les apprentissages dispensés dans les deux groupes étaient aussi motivant et stimulant l'un que l'autre (musique et peinture, [73, 74]). Les résultats ont montré que 6 mois d'apprentissage musical, mais pas de peinture, augmentent les capacités de discrimination des variations de hauteur dans le langage ainsi que la lecture de mots phonologiquement complexes. Ces résultats sont donc en accord avec les résultats montrant une corrélation positive entre capacités musicales et phonologiques [e.g., 2, 64] et ils établissent un lien de causalité entre l'apprentissage de la musique et l'amélioration de la perception du langage et de la lecture.

Sur la base de ces résultats, nous avons utilisé la méthode longitudinale [13] pour déterminer si les résultats décrits ci-dessus chez des enfants musiciens et non-musiciens [15] dépendent de l'apprentissage de la musique plutôt que de prédispositions génétiques pour la musique.

Un total de 24 enfants normolecteurs, âgés de 8 ans en moyenne, ont participé à cette étude en utilisant le même protocole que celui de Chobert *et al.* (2011) [15] avec la syllabe "Ba" comme standard et des petits et des grands déviants en fréquence, en durée et en VOT. Avant l'apprentissage (Temps 0, T0), les enfants ont été testés dans deux sessions de 2 heures chacune. La première comprenait une session de tests neuropsychologiques standards (WISC IV [95] ; les matrices de Raven [71]), des tests attentionnels issus de la batterie NEPSY [41] et des tests orthophoniques issus de la batterie ODEDYS [36]. Au cours de la seconde, l'EEG était enregistré et les enfants avaient pour consigne d'ignorer les sons présentés dans le casque audio et de focaliser leur attention sur le film muet qui leur était présenté. Les enfants devaient ensuite effectuer une tâche d'identification de syllabes. Les stimuli standards, petits déviants et grands déviants en VOT leur étaient présentés et ils devaient indiquer s'ils entendaient un "Ba" ou un "Pa".

Sur la base des résultats obtenus dans les 2 sessions avant apprentissage (T0), les enfants ont été répartis de manière pseudo-aléatoire en 2 groupes équivalents (i.e., non-significativement différents), l'un suivant ensuite un apprentissage de la musique (groupe "Musique"), l'autre suivant un apprentissage de la peinture (groupe "Peinture"). Tous les enfants ont donc suivi 6 mois d'apprentissage de la musique ou de la peinture selon leur groupe (Apprentissage 1). Après 6 mois d'apprentissage (Temps 6, T6), les enfants ont été testés de nouveau dans 2 sessions de 2 heures chacune, qui incluaient les mêmes tests neuropsychologiques, attentionnels et orthophoniques, ainsi que le même test électrophysiologique (MMN) qu'avant l'apprentissage (T0). Les enfants ont ensuite de nouveau suivi 6 mois d'apprentissage (Apprentissage 2). Enfin, ils ont été testés une dernière fois en utilisant les mêmes tests (après 12 mois d'apprentissage = Temps 12, T12).

Les résultats obtenus dans la plupart des tests neuropsychologiques et orthophoniques montrent que les enfants ont un meilleur niveau de performance après 6 mois (T6) et/ou après 12 mois d'apprentissage (T12) qu'avant apprentissage (T0) révélant ainsi un effet de maturation et/ou un effet de la répétition des tests sur le niveau de performance des enfants. Cependant, les résultats n'indiquent pas d'effet spécifique de l'apprentissage de la musique ou de la peinture.

L'analyse de la MMN pour les déviants en fréquence montre que ces derniers suscitent des MMNs plus amples après 12 mois d'apprentissage (T12) qu'après 6 mois (T6) et qu'avant apprentissage (T0 ; (fig. 2)), mais sans qu'il n'y ait de différences entre les groupes "Musique" et "Peinture". Ces résultats vont donc de nouveau dans le sens d'un effet général de maturation et de répétition. Entre T0 et T12, les enfants sont plus âgés de 1 an et 7 mois et le mécanisme présidant au traitement de la fréquence pourrait être plus mature [e.g., 38]. En outre, les enfants en T12 ont déjà effectué la tâche 2 fois et l'effet de répétition peut également expliquer l'augmentation d'amplitude de la MMN dans les deux groupes.

Pour les déviants en durée, les MMNs étaient plus amples chez les enfants après 12 mois d'apprentissage (T12) de la musique qu'à T6 et à T0 (fig. 2), mais pas après apprentissage de la peinture (fig. 2). Ces résultats montrent donc que 12 mois d'apprentissage de la musique améliorent sensiblement le traitement de la durée des syllabes et vont dans le sens des précédents résultats de Chobert *et al.* (2011) [15], suggérant que des processus communs sont mis en jeu par le traitement de la durée des sons linguistiques et musicaux.

Pour les déviants en VOT, les MMNs sont significativement plus amples pour les petits et les grands déviants après 12 mois d'apprentissage (T12) qu'après 6 mois d'apprentissage (T6) et qu'avant apprentissage de la musique (T0 ; (fig. 2)), mais pas après apprentissage de la peinture (fig. 2). Ces résultats sont également en accord avec les résultats de Chobert *et al.* (2011) [15] et avec ceux des études montrant une corrélation positive entre capacités musicales et phonologiques chez les adultes et chez les enfants (e.g., [2, 64, 89]). Cependant, les résultats dans la tâche d'identification de syllabes n'ont pas montré de différences significatives, ni entre les groupes, ni en fonction du temps, ce qui peut s'expliquer par le fait que les enfants sont normolecteurs et qu'ils ont donc déjà des représentations phonologiques solides et fiables avant l'apprentissage de la musique.

Ces résultats illustrent clairement que 12 mois d'apprentissage musical ont des conséquences importantes sur le traitement des caractéristiques acoustiques et phonologiques des sons linguistiques, mais que 6 mois d'apprentissage musical ne sont pas suffisants pour influencer le traitement de ces mêmes paramètres. En utilisant une répartition pseudo-aléatoire des enfants, et en contrôlant

leur intérêt et leur motivation pour les deux apprentissages proposés, cette étude permet ainsi de démontrer un lien de causalité entre l'apprentissage musical et l'augmentation de la sensibilité des enfants aux variations de durée et de VOT. En améliorant la discrimination des caractéristiques acoustiques des sons du langage, l'apprentissage de la musique pourrait donc aider les enfants dyslexiques à développer des représentations phonologiques plus robustes [30] et améliorer ainsi leurs capacités de lecture [97]. Nous avons donc utilisé l'approche longitudinale pour tester cette hypothèse chez des enfants dyslexiques. Cette étude est détaillée ci-dessous après une rapide description des études pertinentes conduites chez les enfants dyslexiques.

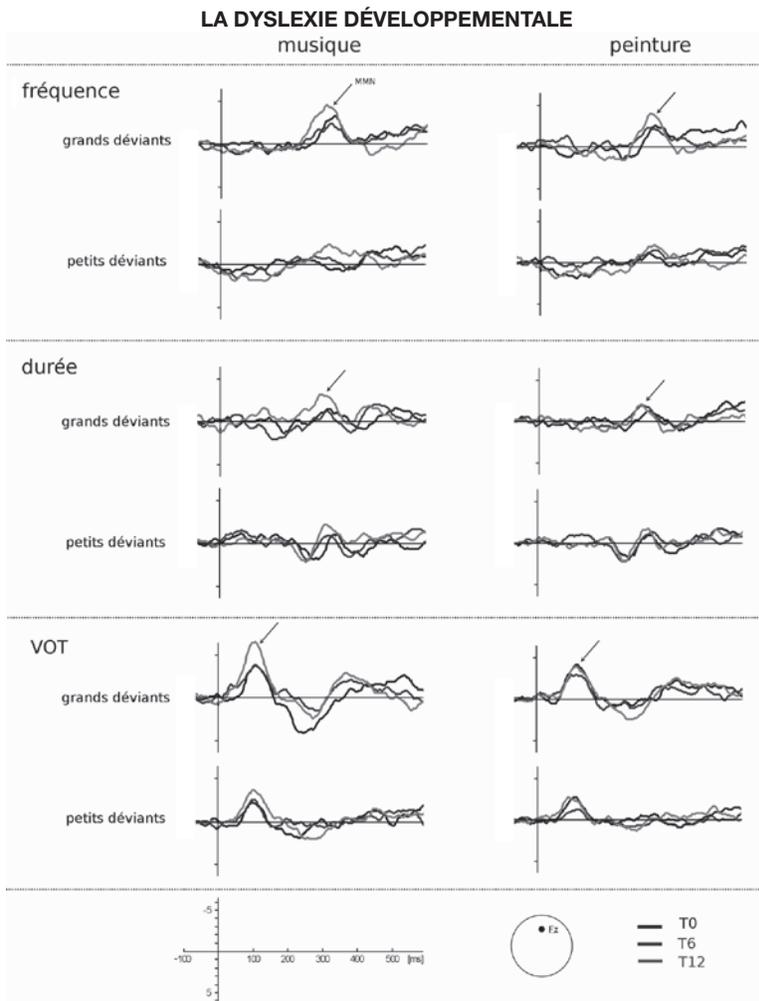


Fig. 2 : MMNs suscitées par les grands et les petits déviants en fréquence (en haut), en durée (au milieu) et en VOT (en bas) chez les enfants normolecteurs du groupe musique (à gauche) et du groupe peinture (à droite), avant apprentissage (T0 en noir), après 6 mois d'apprentissage (T6 en gris moyen) et après 12 mois d'apprentissage (T12 en gris clair).

La dyslexie développementale est un trouble spécifique de l'apprentissage de la lecture en dépit de capacités intellectuelles normales, d'une absence de troubles psychiatriques ou neurologiques, d'un milieu socio-culturel normalement stimulant et d'une scolarisation adéquate [16, 21]. Il n'existe pas à l'heure actuelle de consensus sur la nature et l'origine de la dyslexie, mais le déficit phonologique est le problème le plus couramment rencontré chez les enfants dyslexiques [pour une revue, voir 47, 56, 90, 96]. Cependant, la question reste ouverte de déterminer si ce déficit phonologique dépend de déficits plus généraux au niveau du traitement acoustique [e.g., 8].

Afin de spécifier quels attributs des sons linguistiques posent problème aux enfants dyslexiques, nous avons comparé les MMNs suscitées par les variations de paramètres acoustiques, la fréquence et la durée de syllabes, et d'un paramètre phonologique, le VOT. Il est important de noter que l'étude de la MMN permet d'analyser le traitement auditif sans qu'il ne soit demandé aux enfants de focaliser leur attention sur la séquence de sons. Ceci permet ainsi de s'affranchir des troubles de l'attention souvent rencontrés chez les enfants dyslexiques.

Le traitement pré-attentif de déviants en fréquence a été étudié chez les dyslexiques dans des études utilisant des sons purs. En général, les grands déviants suscitent des MMNs d'amplitude comparable chez les dyslexiques et chez les normolecteurs, adultes et enfants [e.g., 81]. En revanche, les petits déviants suscitent des MMNs plus petites chez les adultes dyslexiques que chez les normolecteurs [e.g., 3, 43] mais pas chez les enfants [17, 18, 80].

Aucune étude n'a, à notre connaissance, examiné le traitement pré-attentif de la fréquence des syllabes chez les enfants dyslexiques. Lovio, Näätänen & Kujala (2010) [51] ont comparé le traitement pré-attentif de déviants sur la voyelle, la consonne, la fréquence de la voyelle, la durée de la voyelle et l'intensité de la syllabe chez des enfants de 6 ans à risque pour la dyslexie et des enfants de contrôle de même âge chronologique. Ils n'ont pas montré de différence au niveau de l'amplitude des MMNs suscitées par des déviants sur la fréquence des syllabes, suggérant ainsi une absence de déficit du traitement pré-attentif de la fréquence des syllabes chez les enfants dyslexiques.

Concernant le traitement de la durée des sons purs, certaines études ont mis en évidence des MMNs d'amplitudes similaires chez les dyslexiques et chez les normolecteurs en utilisant des sons standard longs [3, 33, 43, 44] mais, d'autres résultats ont révélé des MMNs plus petites chez les dyslexiques en utilisant des sons standards plus courts [17, 34]. Ces résultats suggèrent un déficit du traitement des durées courtes comparées aux durées longues chez les enfants dyslexiques. Ils sont donc en accord avec d'autres résultats montrant un déficit du traitement des stimuli courts et des transitions rapides chez les dyslexiques [26, 92 ; voir 93, pour une revue].

En utilisant des sons linguistiques, Kujala *et al.* (2006) [43] ont comparé les traitements attentif et pré-attentif de la durée de syllabes dans des pseudo-mots (e.g., /taatata/, /tataata/ or /tatataa/) chez des enfants dyslexiques et normolecteurs. Au niveau pré-attentif, les MMNs étaient similaires chez les enfants dyslexiques et normolecteurs. En revanche, lorsque les enfants devaient rapporter la position la voyelle allongée dans le pseudo-mot (1^{re}, 2^e ou 3^e syllabe), l'amplitude de la composante N2b (composante des PEs typiquement associée au processus de catégorisation) [e.g., 91] était plus petite chez les dyslexiques que chez les normolecteurs, suggérant un déficit du traitement de la durée des syllabes chez les dyslexiques, uniquement au niveau attentif. Néanmoins, au niveau pré-

attentif, les MMNs suscitées par des déviants en durée des syllabes sont plus tardives chez les enfants dyslexiques Indiens que chez les normolecteurs [87]. Enfin, très récemment, Lovio *et al.* (2010) [51] ont montré que les MMNs sont de plus petite amplitude chez des enfants Finnois à risque pour la dyslexie comparés à des enfants normolecteurs.

Concernant le VOT et comme mentionné précédemment, chez les normolecteurs les variations intra-catégorielles sont moins nettement perçues et suscitent des MMNs plus petites que les changements inter-catégoriels [88]. En revanche, chez les dyslexiques, la discrimination inter-catégorielle serait moins bonne que chez les normolecteurs (e.g., [9]) mais ils présenteraient une plus grande sensibilité aux variations intra-catégorielles, ce qui les rendrait également sensibles à toutes les variations phonémiques (inter- et intra-catégorielles; [e.g., 22, 82]). Deux études ont directement comparé les MMNs suscitées par des déviants en VOT chez les dyslexiques et chez les normolecteurs. Csépe (2003) [18] a utilisé des déviants en VOT (/ba/ vs. /pa/) et en lieu d'articulation (/ba/ vs. /da/) dans une séquence de syllabes /ba/ et les MMNs sont plus petites et plus tardives chez les enfants dyslexiques que chez les enfants normolecteurs. Shankarnarayan & Maruthy (2007) [87] ont présenté des déviants en VOT (/tʂa/ vs. /dʂa/), en lieu d'articulation (/da/ vs. /ɖa/), en mode d'articulation (/tʂa/ vs. /sa/) ainsi que des déviants en durée de la voyelle de la syllabe "da" pour comparer des enfants Indiens dyslexiques et normolecteurs de 7-12 ans. De plus, ils ont utilisé une séquence non-linguistique avec des déviants en fréquence et en durée. Les MMNs sont plus tardives chez les enfants dyslexiques que chez les enfants de contrôle pour les déviants sur tous les traits linguistiques, sur la durée de la voyelle ainsi que sur la fréquence dans la séquence de sons non-linguistiques, mais pas sur la durée dans les sons non-linguistiques. Selon les auteurs, le traitement des sons, qu'ils soient linguistiques ou non-linguistiques, serait affecté par la dyslexie, suggérant ainsi qu'un déficit du traitement acoustique non-linguistique serait responsable du déficit de traitement de certains paramètres phonologiques chez les enfants dyslexiques.

En résumé, les résultats obtenus chez l'enfant tendent à montrer un déficit du traitement du VOT (et du lieu d'articulation) chez les enfants dyslexiques [18, 87] ainsi qu'un déficit du traitement des durées courtes [17, 26, 34, 92, 93] mais pas de déficit du traitement pré-attentif de la fréquence [17, 18, 80].

Avant d'examiner les effets de l'apprentissage de la musique chez les enfants dyslexiques, nous avons comparé le traitement pré-attentif de la fréquence, de la durée et du VOT chez les enfants dyslexiques et normolecteurs [12]. Vingt-quatre enfants dyslexiques de 10 ans en moyenne, et 24 normolecteurs âgés de 8 ans en moyenne, ont été testés en utilisant le même protocole MMN que précédemment. Ces 48 enfants ont été divisés en 4 sous-groupes, deux groupes appariés sur l'âge chronologique afin de contrôler les effets liés à la maturation et deux groupes appariés sur l'âge de lecture. En accord avec les résultats de la littérature, les déviants en fréquence ont suscité des MMNs d'amplitude comparable chez les enfants dyslexiques et normolecteurs (fig. 3). En revanche, alors que chez les normolecteurs, les MMNs associées aux déviants en durée étaient plus grandes pour les grands que pour les petits déviants, cet effet de taille de la déviance n'était pas significatif chez les enfants dyslexiques (fig. 3) [51, 87].

Concernant le traitement du VOT, les MMNs étaient plus amples chez les normolecteurs que chez les dyslexiques (fig. 3). L'analyse de l'effet de la taille de la déviance révèle, en outre, des résultats intéressants. Chez les normolecteurs, les grands déviants suscitaient des MMNs plus grandes que les petits déviants

(fig. 3). Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus dans la tâche d'identification, les normolecteurs identifient le plus souvent les grands déviants comme la syllabe "Pa" (i.e., comme une variation inter-catégorielle). Un patron de réponses très différent est observé chez les enfants dyslexiques. Les grands et les petits déviants en VOT suscitent des MMNs d'amplitude similaire (fig. 3), comparables à l'amplitude de la MMN aux petits déviants enregistrée chez les enfants normolecteurs. Les résultats dans la tâche d'identification de syllabes montrent que les grands déviants, comme les petits déviants, sont le plus souvent identifiés comme "Ba" (i.e., comme une variation intra-catégorielle) par les enfants dyslexiques. Ainsi, les données comportementales obtenues au test d'identification de syllabes correspondent très bien aux modulations d'amplitude observées au niveau de la MMN. Les résultats obtenus au niveau pré-attentif, en utilisant la MMN, sont donc en accord avec l'interprétation proposée par Serniclaes, Sprenger-Charolles, Carre, & Demonet (2001) [83] selon laquelle les enfants dyslexiques montreraient un déficit de discrimination inter-catégorielle au niveau attentif.

Les déficits observés chez les enfants dyslexiques au niveau pré-attentif de la durée et du VOT sont également en accord avec l'hypothèse selon laquelle les déficits acoustiques contribuent aux déficits phonologiques [e.g., 30, 87]. Si les enfants dyslexiques ne traitent pas aussi bien que les enfants normolecteurs les éléments acoustiques qui composent les sons linguistiques, les représentations phonologiques élaborées à partir de ces éléments sont moins fiables que pour les normolecteurs. Or, des représentations phonologiques fiables sont nécessaires pour effectuer la conversion graphème-phonème dans la lecture.

L'apprentissage de la musique, en améliorant la perception des variations de durée, améliorerait également la perception du VOT. Ces améliorations pour-

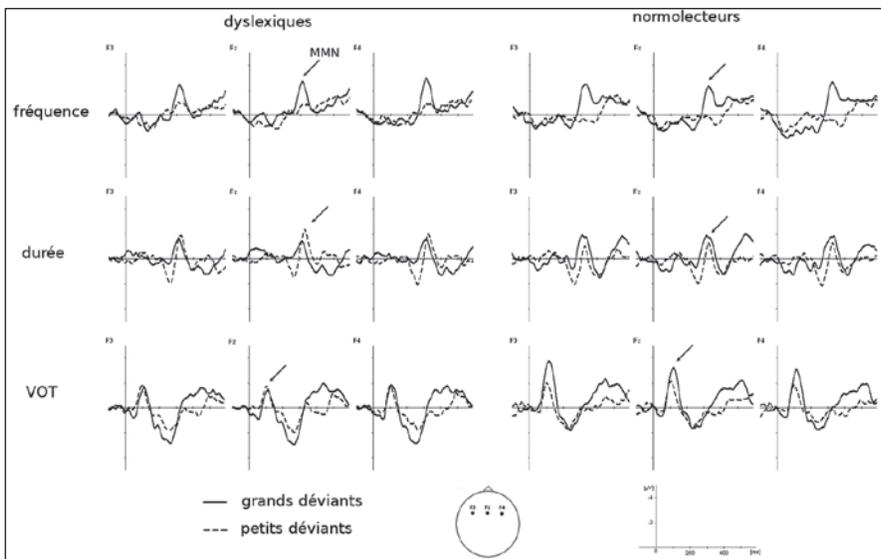


Fig. 3 : MMNs suscitées par les grands déviants (en trait plein) et les petits déviants (en pointillés) en fréquence (en haut), en durée (au milieu) et en VOT (en bas) chez les enfants dyslexiques (à gauche) et normolecteurs (à droite).

raient alors contribuer au développement de représentations phonologiques plus robustes et avoir ainsi un impact sur les capacités de lecture des enfants dyslexiques. C'est l'hypothèse que nous avons testée dans l'étude suivante [14]. En utilisant la méthode longitudinale et le même protocole expérimental que précédemment, nous avons examiné un total de 24 enfants dyslexiques âgés de 10 ans au moyen de tests neuropsychologiques, attentionnels et électrophysiologiques. Sur la base des résultats avant apprentissage (T0), les enfants ont été répartis de manière pseudo-aléatoire en deux groupes homogènes (un groupe "Musique" et un groupe "Peinture"). Les enfants ont été re-testés, en utilisant ces mêmes tests, après 6 mois d'apprentissage (T6).

Les résultats présentés ici sont encore préliminaires et nécessitent d'être complétés par des analyses complémentaires. Notons toutefois que les résultats ne montrent pas d'effet spécifique de l'apprentissage de la musique ou de la peinture sur les tests neuropsychologiques et orthophoniques. En accord avec les résultats chez les enfants normolecteurs [13], l'amplitude des MMNs suscitées par les déviants en fréquence ne semble pas influencée par 6 mois d'apprentissage musical chez les enfants dyslexiques. En revanche, l'amplitude des MMNs aux déviants en VOT semble plus grande après 6 mois d'apprentissage de la musique, mais pas de la peinture (fig. 4). De plus, l'effet de la taille de la déviance (i.e., différence entre grands et petits déviants en VOT) qui n'était pas significatif avant apprentissage chez les enfants dyslexiques alors qu'il était significatif chez les enfants normolecteurs, semble se développer après 6 mois d'apprentissage de la musique chez les enfants dyslexiques (fig. 4), mais pas après 6 mois d'apprentissage de la peinture. Une courte période d'apprentissage musical pourrait donc normaliser le patron de MMNs associées aux déviants en VOT, avec des MMNs aux déviants inter-catégoriels (grands déviants) plus grandes que les MMNs aux déviants intra-catégoriels (petits déviants ; [19, 20, 88]), démontrant ainsi des effets de plasticité cérébrale. En complément aux séances d'orthophonie, l'apprentissage de la musique pourrait donc être utilisé comme une aide à la remédiation des déficits du traitement acoustique et phonologique souvent rencontrés chez les enfants dyslexiques.

Pris dans leur ensemble, ces résultats sont importants pour deux raisons. Premièrement, en montrant que l'apprentissage de la musique influence le traitement des unités de base du langage, les syllabes, ils vont à l'encontre d'une conception modulaire et informationnellement encapsulé du langage [24, 25] qui serait indépendant des autres capacités perceptives et cognitives [68, 69]. Deuxièmement, ces résultats indiquent que l'apprentissage musical ne facilite pas seulement le traitement des paramètres acoustiques tel que la durée ou la fréquence, mais améliore également la perception de paramètres linguistiques plus abstraits tel que le VOT. Cette augmentation de sensibilité permettrait aux enfants de construire des représentations phonologiques plus précises et mieux adaptées à la perception du langage. Ces représentations phonologiques étant spécifiques au langage et absentes dans la musique, ces résultats démontrent clairement un effet positif de transfert d'apprentissage de l'expertise musicale vers le traitement des syllabes dans le langage. Cette étude apporte donc des arguments en faveur de l'importance des cours de musique à l'école et ils ouvrent de nouvelles perspectives pour faciliter le développement des représentations phonologiques nécessaires à la lecture, notamment chez les enfants dyslexiques.

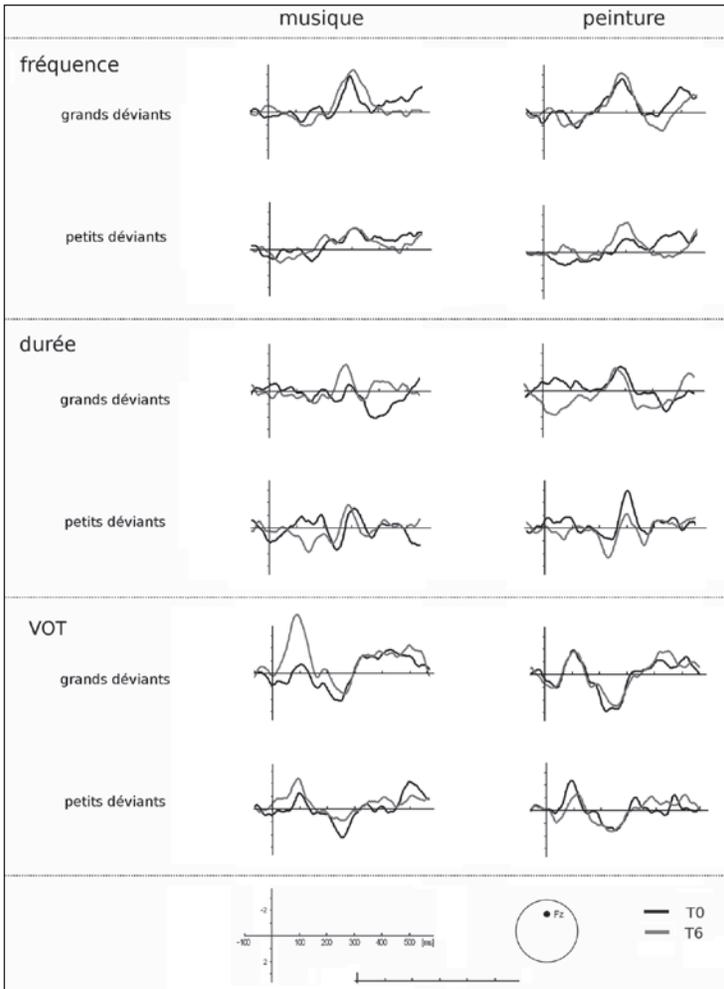


Fig. 4 : MMNs suscitées par les grands et les petits déviants en fréquence (en haut), en durée (au milieu) et en VOT (en bas) chez les enfants dyslexiques du groupe musique (à gauche) et du groupe peinture (à droite), avant apprentissage (T0 en noir) et après 6 mois d'apprentissage (T6 en gris).

RÉSUMÉ

Afin d'étudier l'influence de l'expertise musicale et de l'apprentissage de la musique sur le traitement pré-attentif des syllabes chez des enfants normolecteurs et dyslexiques, nous avons conduit quatre expériences en analysant les négativités de discordances ou *Mismatch Negativity* (MMNs) suscitées par des variations de fréquence, de durée et de *Voice Onset Time* (VOT).

La comparaison des enfants musiciens et non-musiciens montre que l'expertise musicale améliore le traitement pré-attentif de la durée des syllabes et du VOT. En utilisant la méthode longitudinale, nous avons ensuite pu démontrer que cette amélioration pouvait être suscitée par 12 mois d'apprentissage de la

musique chez des enfants normolecteurs non-musiciens. Cet avantage ne résulterait donc pas uniquement de prédispositions génétiques pour la musique mais, serait causalement lié à l'apprentissage musical.

Contrairement aux enfants musiciens, les enfants dyslexiques présentent un déficit du traitement de la durée des syllabes et du VOT. Cependant, six mois d'apprentissage musical semblent améliorer le traitement pré-attentif du VOT chez les enfants dyslexiques, suggérant que l'apprentissage musical pourrait être utilisé comme une aide à la remédiation de la dyslexie.

L'apprentissage de la musique, en améliorant la sensibilité des enfants aux paramètres acoustiques (durée) dans la musique et dans le langage (processus communs), augmenterait également leur sensibilité aux paramètres phonologiques (VOT) associés et permettrait ainsi la construction de représentations phonologiques plus robustes (transfert d'apprentissage de la musique vers le langage).

Dans cette revue, nous décrivons une série de quatre expériences réalisées chez des enfants, musiciens ou non-musiciens, normolecteurs ou dyslexiques. Le but de ces expériences est de déterminer si l'apprentissage de musique permet de pallier certains des problèmes rencontrés par les enfants dyslexiques. Avant de décrire ces problèmes, nous présenterons les résultats des expériences centrées sur les effets de l'expertise musicale sur le traitement des sons musicaux et linguistiques, qui ont servi de base à nos travaux.

Remerciements

Les expériences décrites dans ce papier ont été conduites à l'“*Institut de Neurosciences Cognitives de la Méditerranée*” (INCM), CNRS-Universités Aix-Marseille, France. Ces recherches étaient supportées par une allocation de l'ANR-Neuro (#024-01) à Mireille Besson. Julie Chobert était doctorante également supportée par l'ANR-Neuro (#024-01). Julie Chobert est actuellement post-doctorante supportée par une allocation de la Fondation de France (#00015167) à Mireille Besson. Nous remercions Clément François, Daniele Schön et Jean-Luc Velay pour leur participation aux différentes étapes de ces études, les professeurs de musique et de peinture qui sont intervenus lors des phases d'apprentissage et l'Association Résodys dirigée par le Dr Michel Habib. Nous remercions tous les enfants qui ont participé à ces études, leurs parents ainsi que les enseignants et directeurs des écoles dans lesquelles ces recherches ont été conduites.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ALTENMUELLER E. Electrophysiological correlates of music processing in the human brain. *Eur Arch Psychiatr Neurol Sci*, 1986;235:342-354. — [2] ANVARI SH, TRAINOR LJ, WOODSIDE J, LEVY BA. Relations among musical skills, phonological processing, and early reading ability in preschool children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 2002;83(2): 111-130. — [3] BALDEWEG T, RICHARDSON A, WATKINS S, FOALE C, GRUZELIER J. Impaired auditory frequency discrimination in dyslexia detected with mismatch evoked potentials. *Annals of Neurology*, 1999;45(4):495-503. — [4] BANGERT M, PESCHEL T, SCHLAUG G, et al. Shared networks for auditory and motor processing in professional pianists: Evidence from fMRI conjunction. *Neuroimage* 2006;30(3):917-926. — [5] BESSON M, FAÏTA, F. An Event-Related Potential (ERP) Study of Musical Expectancy: Comparison of Musicians With Nonmusicians. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1995; 21(6):1278-1296. — [6] BESSON M, FRIEDERICI AD. Language and music: A comparative view. *Music Perception*, 1998;16(1):1-9. — [7] BESSON M, SCHÖN D. Comparison between music and language. *The Cognitive Neuroscience of Music*. Oxford University Press, Oxford, 2003: 269-293. — [8] BISHOP DVM. Using mismatch negativity to study central auditory processing in

- developmental language and literacy impairments: where are we, and where should we be going? *Psychological bulletin*, 2007;133(4):651. — [9] BOGLIOTTI C, SERNICLAES W, MESSAOUD-GALUSI S, SPRENGER-CHAROLLES, L. Discrimination of speech sounds by children with dyslexia: Comparisons with chronological age and reading level controls. *Journal of Experimental Child Psychology*, 2008;101(2):137-155. —
- [10] BOLDUC J, MONTÉSINOS-GELET, I. Pitch awareness and phonological awareness. *Psychomusicology*, 2005;19(1):3-14.
- [11] BUTZLAFFR. Can Music Be Used To Teach Reading? *Journal of Aesthetic Education*, 2000;34(3):167-78. — [12] CHOBERT J, FRANÇOIS C, HABIB M, BESSON M. Deficit in the preattentive processing of syllables in children with dyslexia. *Neuropsychologia*, en révision. — [13] CHOBERT J, FRANÇOIS C, VELAY JL, & BESSON, M. Twelve month of musical training in children enhances the pre-attentive processing of syllabic duration and Voice Onset Time. en préparation. — [14] CHOBERT J, FRANÇOIS, C, VELAY, JL, HABIB, M, BESSON, M. Musical training as an aid for phonological remediation in dyslexia. en préparation. — [15] CHOBERT J, MARIE C, FRANÇOIS C, SCHÖN D, BESSON M. Enhanced Passive and Active Processing of Syllables in Musician Children. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2011;23(12):3874-3887. — [16] COLLECTIVE EXPERTISE INSERM, CNDRSDI. Dyslexie, dysorthographe, dyscalculie: bilan des données scientifiques, 2007. — [17] CORBERA S, ESCERA C, ARTIGAS J. Impaired duration mismatch negativity in developmental dyslexia. *NeuroReport*, 2006;17(10):1051-1055. — [18] CSÉPE V. *Dyslexia: different brain, different behavior*. Springer 2003. — [19] DEHAENE-LAMBERTZ G. Electrophysiological correlates of categorical phoneme perception in adults. *NeuroReport*, 1997;8(4):919. — [20] DEHAENE-LAMBERTZ G, BAILLET, S. A phonological representation in the infant brain. *Neuroreport*, 1998;9(8):1885.
- [21] DÉMONET JF, TAYLOR MJ, CHAIX Y. Developmental dyslexia. *The Lancet*, 2004;363(9419): 1451-1460. — [22] DUFOR O, SERNICLAES W, SPRENGER-CHAROLLES L, DÉMONET JF. Left premotor cortex and allophonic speech perception in dyslexia: a PET study. *Neuroimage*, 2009;46(1):241-248. — [23] ELBERT T, PANTEV C, WIENBRUCH C, ROCKSTROH B, TAUB E. Increased cortical representation of the fingers of the left hand in string players. *Science*, 1995;270(5234):305. — [24] FODOR J. *The mind doesn't work that way: The scope and limits of computational psychology*. The MIT Press, 2001. — [25] FODOR J. *The modularity of Mind*. MIT Press, 1983. — [26] FRUMKIN B, RAPIN I. Perception of vowels and consonant-vowels of varying duration in language impaired children. *Neuropsychologia*, 1980;18(4-5):443-454. — [27] FUJIOKA T, ROSS B, KAKIGI R, PANTEV C, TRAINOR LJ. One year of musical training affects development of auditory cortical-evoked fields in young children. *Brain*, 2006;129(10):2593. — [28] GAAB N, SCHLAUG G. Musicians differ from nonmusicians in brain activation despite performance matching. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2003;999(1):385-388. — [29] GASER C, SCHLAUG G. Brain structures differ between musicians and non-musicians. *Journal of Neuroscience*, 2003;23(27):9240. — [30] GOSWAMI U. A temporal sampling framework for developmental dyslexia. *Trends in cognitive sciences*, 2011;15(1):3-10.
- [31] HAN Y, YANG H, LV YT, et al. Gray matter density and white matter integrity in pianists' brain: A combined structural and diffusion tensor MRI study. *Neuroscience letters*, 2009;459(1):3-6. — [32] HUTCHINSON S, LEE LH, GAAB N, SCHLAUG G. Cerebellar volume of musicians. *Cerebral cortex*, 2003;13(9):943. — [33] HUTTUNEN T, HALONEN A, KAARTINEN J, LYYTINEN H. Does mismatch negativity show differences in reading-disabled children compared to normal children and children with attention deficit? *Developmental neuropsychology*, 2007;31(3):453-470. — [34] HUTTUNEN-SCOTT T, KAARTINEN J, TOLVANEN A, LYYTINEN H. Mismatch negativity (MMN) elicited by duration deviations in children with reading disorder, attention deficit or both. *International Journal of Psychophysiology*, 2008;69(1):69-77. — [35] HYDE KL, LERCH J, NORTON A, et al. Musical training shapes structural brain development. *Journal of Neuroscience*, 2009;29(10):3019. — [36] JACQUIER-ROUX M, VALDOIS S, ZORMAN MO. Outil de dépistage des dyslexies. *Cogni-Sciences: Grenoble*, 2005. — [37] JÄNCKE L. The case of a left-handed pianist playing a reversed keyboard: a challenge for the neuroscience of music. *Neuroreport*, 2002;13(13):1579. — [38] JENSEN JK, NEFF DL. Development of basic auditory discrimination in preschool children. *Psychological Science*, 1993;4(2):104. — [39] KEENAN JP, THANGARAJ V, HALPERN AR, SCHLAUG G. Absolute pitch and planum temporale. *Neuroimage*, 2001;14(6):1402-1408. — [40] KOELSCH S, FRITZ T, SCHULZE K, ALSOP D, SCHLAUG G. Adults and children processing music: An fMRI study. *Neuroimage*, 2005;25(4):1068-1076.
- [41] KORKMAN M, KIRK U, KEMP S. NEPSY: A developmental neuropsychological assessment. *Psychological Corporation San Antonio, TX*, 1998. — [42] KRAUS N, CHANDRASEKARAN B. Music training for the development of auditory skills. *Nature Reviews. Neuroscience*, 2010;11(8):599-605. — [43] KUJALA T, LOVIO R, LEPISTO T, LAASONEN M, NAATANEN R. Evaluation of multi-attribute auditory discrimination in dyslexia with the mismatch negativity. *Clinical Neurophysiology*, 2006;117(4):885-893. — [44] KUJALA T, HALMETOJA J, NÄÄTÄNEN R, ALKU P, LYYTINEN H, SUSSMAN E. Speech-and sound-segmentation in dyslexia: evidence for a multiple-level cortical impairment. *European Journal of Neuroscience*, 2006;24(8):2420-2427. — [45] KURIKI S, KANDA S, HIRATA Y. Effects of musical experience on different components of MEG responses elicited by sequential piano-tones and chords. *Journal of Neuroscience*, 2006;26(15):4046. — [46] LAMB SJ, GREGORY AH. The relationship between music and reading in beginning readers. *Educational Psychology*,

- 1993;13:19-26. — [47] LIBERMAN IY, SHANKWEILER D. Phonology and the problems of learning to read and write. *Remedial and Special Education*, 1985;6(6):8-17. — [48] LISKER L, ABRAMSON AS. Some effects of context on voice onset time in English stops. *Language and Speech*, 1967;10(1):1-28. — [49] LOTZE M, SCHELER G, TAN HR, BRAUN C, BIRBAUMER N. The musician's brain: functional imaging of amateurs and professionals during performance and imagery. *Neuroimage*, 2003;20(3):1817-1829. — [50] LOUI P, CHARLES LI H, HOHMANN A, SCHLAUG G. Enhanced Cortical Connectivity in Absolute Pitch Musicians: A Model for Local Hyperconnectivity. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2011;23(4):1015-1026.
- [51] LOVIO R, NÄÄTÄNEN R, KUJALA T. Abnormal pattern of cortical speech feature discrimination in 6-year-old children at risk for dyslexia. *Brain Research*, 2010;1335:53-62. — [52] LUDERS E, GASER C, JANCKE L, SCHLAUG G. A voxel-based approach to gray matter asymmetries. *Neuroimage*, 2004;22(2):656-664. — [53] MAGNE C, SCHÖN D, BESSON M. Musician children detect pitch violations in both music and language better than nonmusician children: behavioral and electrophysiological approaches. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2006;18(2):199-211. — [54] MARGULIS EH, MLSNA LM, UPPUNDA AK, PARRISH TB, WONG P. Selective neurophysiologic responses to music in instrumentalists with different listening biographies. *Human brain mapping*, 2009;30(1):267-275. — [55] MILOVANOV R, HUOTILAINEN M, ESQUEF PA, ALKU P, VÄLIMÄKI V, TERVANIEMI M. The role of musical aptitude and language skills in preattentive duration processing in school-aged children. *Neuroscience letters*, 2009;460(2):161-165. — [56] MODY M. Phonological basis in reading disability: A review and analysis of the evidence. *Reading and Writing*, 2003;16(1):21-39. — [57] MORENO S, MARQUES C, SANTOS A, SANTOS M, CASTRO SL, BESSON M. Musical training influences linguistic abilities in 8-year-old children: More evidence for brain plasticity. *Cerebral Cortex*, 2009;19(3):712. — [58] MÜNTE TF, ALTENMÜLLER E, JÄNCKE L. The musician's brain as a model of neuroplasticity. *Nature Reviews Neuroscience*, 2002;3(6):473-478. — [59] MUSACCHIA G, SAMS M, SKOE E, KRAUS N. Musicians have enhanced subcortical auditory and audiovisual processing of speech and music. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007;104(40):15894-15898. — [60] MUSACCHIA G, STRAIT D, KRAUS N. Relationships between behavior, brainstem and cortical encoding of seen and heard speech in musicians and non-musicians. *Hearing research*, 2008;241(1-2):34-42.
- [61] NÄÄTÄNEN R, GAILLARD AW, MÄNTYSALO S. Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta psychologica*, 1978;42(4):313-329. — [62] NÄÄTÄNEN R, PAKARINEN S, RINNE T, TAKEGATA R. The mismatch negativity (MMN): towards the optimal paradigm. *Clinical Neurophysiology*, 2004;115(1):140-144. — [63] NORTON A, WINNER E, CRONIN K, OVERY K, LEE DJ, SCHLAUG G. Are there pre-existing neural, cognitive, or motoric markers for musical ability? *Brain and cognition*, 2005;59(2):124-134. — [64] OVERY K. Dyslexia and music. From timing deficits to musical intervention. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2003;999:497-505. — [65] PANTEV C, OOSTENVELD R, ENGELIEN A, ROSS B, ROBERTS LE, HOKE M. Increased auditory cortical representation in musicians. *Nature*, 1998;392(6678):811-814. — [66] PATEL AD. Music, language, and the brain. *Oxford University Press*, 2008. — [67] PHILLIPS C, PELLATHY T, MARANTZ A, et al. Auditory cortex accesses phonological categories: an MEG mismatch study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2000;12(6):1038-1055. — [68] PINKER S. So how does the mind work? *Mind & Language*, 2005;20(1):1-24. — [69] PINKER S. *How the mind works*. New York: Norton, 1997. — [70] PULLI K, KARMA K, NORIO R, SISTONEN P, GÖRING HHH, JÄRVELÄ, I. Genome-wide linkage scan for loci of musical aptitude in Finnish families: evidence for a major locus at 4q22. *Journal of medical genetics*, 2008;45(7):451.
- [71] RAVEN JC, CORPORATION P, LEWIS HK. *Coloured progressive matrices: sets A, AB, B*. HK Lewis London, 1962. — [72] SCHELLENBERG EG. Music and nonmusical abilities. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2001;930(1):355-371. — [73] SCHELLENBERG EG. Music lessons enhance IQ. *Psychological Science* 2004;15(8):511. — [74] SCHELLENBERG EG. Long-term positive associations between music lessons and IQ. *Journal of Educational Psychology*, 2006;98(2):457. — [75] SCHLAUG G. The brain of musicians. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2001;930(1):281-299. — [76] SCHLAUG G, JÄNCKE L, HUANG Y, STAIGER JF, STEINMETZ H. Increased corpus callosum size in musicians. *Neuropsychologia*, 1995;33(8):1047-1055. — [77] SCHLAUG G, NORTON A, OVERY K, WINNER E. Effects of music training on the child's brain and cognitive development. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2005;1060:219-230. — [78] SCHNEIDER P, SCHERG M, DOSCH HG, SPECHT HJ, GUTSCHALK A, RUPP A. Morphology of Heschl's gyrus reflects enhanced activation in the auditory cortex of musicians. *Nature Neuroscience*, 2002;5(7):688-694. — [79] SCHÖN D, MAGNE C, BESSON M. The music of speech: Music training facilitates pitch processing in both music and language. *Psychophysiology*, 2004;41(3):341-349. — [80] SCHULTE-KÖRNE G, DEIMEL W, BARTLING J, REMSCHMIDT H. Auditory processing and dyslexia: evidence for a specific speech processing deficit. *Neuroreport*, 1998;9(2):337-340.
- [81] SCHULTE-KÖRNE G, DEIMEL W, BARTLING J, REMSCHMIDT H. Speech perception deficit in dyslexic adults as measured by mismatch negativity (MMN). *International Journal of Psychophysiology*, 2001;40(1):77-87. — [82] SERNICLAES W, HEGHE SV, MOUSTY P, CARRÉ R, SPRENGER-CHAROLLES L. Allophonic mode of speech perception in dyslexia. *Journal of Experimental Child Psychology*, 2004;87(4):336-361. — [83] SERNICLAES W, SPRENGER-CHAROLLES L, CARRE R,

- DEMONET JF. Perceptual discrimination of speech sounds in developmental dyslexia. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 2001;44(2):384. — [84] SHAHIN A, BOSNYAK DJ, TRAINOR LJ, ROBERTS LE. Enhancement of neuroplastic P2 and N1c auditory evoked potentials in musicians. *Journal of Neuroscience*, 2003;23(13):5545. — [85] SHAHIN A, ROBERTS LE, PANTEV C, TRAINOR LJ, ROSS B. Modulation of P2 auditory-evoked responses by the spectral complexity of musical sounds. *Neuroreport*, 2005;16(16):1781. — [86] SHAHIN AJ, ROBERTS LE, CHAU W, TRAINOR LJ, MILLER LM. Music training leads to the development of timbre-specific gamma band activity. *Neuroimage*, 2008;41(1):113-122. — [87] SHANKARNARAYAN VC, MARUTHY S. Mismatch negativity in children with dyslexia speaking Indian languages. *Behavioral and Brain Functions*, 2007;3(1):36. — [88] SHARMA A, DORMAN MF. Cortical auditory evoked potential correlates of categorical perception of voice-onset time. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1999;106:1078-83. — [89] SLEVC LR, MIYAKE A. Individual differences in second-language proficiency. *Psychological Science*, 2006;17(8):675-681. — [90] SNOWLING M. Dyslexia as a Phonological Deficit: Evidence and Implications. *Child and Adolescent Mental Health*, 1998;3(1):4-11.
- [91] SUSSMAN E, KUJALA T, HALMETOJA J, LYYTINEN H, ALKU P, NÄÄTÄNEN R. Automatic and controlled processing of acoustic and phonetic contrasts. *Hearing research*, 2004;190(1-2):128-140. — [92] TALLAL P, PIERCY M. Developmental aphasia: Rate of auditory processing and selective impairment of consonant perception. *Neuropsychologia*, 1974;12(1):83-93. — [93] TALLAL P. *Experimental studies of language learning impairments: From research to remediation*. (Speech and language impairments in children: causes, characteristics, intervention and outcome.). Psychology Press, 2001. — [94] TRAINOR LJ, SHAHIN A, ROBERTS LE. Effects of musical training on the auditory cortex in children. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2003;999(1):506-513. — [95] WECHSLER D. WECHSLER Intelligence Scale for Children—Fourth Edition (WISC-IV). San Antonio, TX: The Psychological Corporation, 2003. — [96] ZIEGLER JC, GOSWAMI U. Reading acquisition, developmental dyslexia, and skilled reading across languages: a psycholinguistic grain size theory. *Psychological Bulletin*, 2005;131(1):3-29. — [97] ZIEGLER JC, GOSWAMI U. Becoming literate in different languages: similar problems, different solutions. *Developmental Science*, 2006;9(5):429-436.