

Comment la musique (et la danse) restructurent le cerveau des enfants dyslexiques.

La dyslexie, définie comme un défaut d'acquisition des mécanismes de la lecture, est un trouble neurologique, en grande partie génétique, mais très dépendant dans son expression de facteurs de l'environnement. Elle est considérée actuellement comme faisant partie des troubles du neurodéveloppement (TND), dont elle constitue de fait la forme de loin la plus fréquente, à côté des autres troubles du langage oral et écrit (dysphasie, dysgraphie), du trouble déficitaire d'attention (TDAH), des troubles du développement des coordinations (dyspraxie) et de l'autisme. Leurs mécanismes communs supposés de même que la fréquence de leurs associations réciproques, font qu'on leur propose volontiers aujourd'hui des solutions thérapeutiques communes.

Parmi elles, un effort singulier de la recherche scientifique se porte sur l'efficacité potentielle de la musique et de la danse.

La musique et la danse ont de tout temps été utilisées à des fins thérapeutiques, principalement pour des troubles émotionnels et du comportement. Déjà les textes de l'Antiquité grecque, comme ceux des traditions biblique ou orientale, vantaient les mérites de la musique et de la danse dans l'éducation des enfants et citaient de manière plus ou moins anecdotique des pratiques thérapeutiques basées sur ces constats. Ces pratiques, qui se sont poursuivies presque inchangées jusqu'au Moyen Âge et à la Renaissance, et sont ensuite tombées en désuétude, au moins dans les civilisations occidentales, jusqu'à l'époque moderne où elles ont commencé à entrer dans le giron de la démarche scientifique avec la mise en évidence à la fois par des pédagogues et des thérapeutes de modifications significatives des comportements et des fonctions cognitives sous l'effet de la pratique musicale.

Au cours des deux dernières décennies, les chercheurs se sont attachés à examiner si une pratique musicale régulière des enfants en âge d'apprentissage avait une influence positive sur les capacités cognitives non musicales, cherchant ainsi à démontrer l'existence d'un « transfert » entre les capacités cognitives impliquées dans la musique et celles impliquées dans les apprentissages scolaires, notamment dans celui de la lecture.

Alors que la réalité d'un tel transfert fait encore débat d'un point de vue strictement théorique, des données de plus en plus convaincantes, principalement issues des neurosciences, se sont accumulées en faveur d'un véritable effet thérapeutique de la musique sur les enfants souffrant de difficultés spécifiques de ces mêmes apprentissages, ce qu'il est convenu d'appeler aujourd'hui les « troubles dys ». Le mécanisme neurologique de cet effet a pu être mis en évidence grâce aux techniques d'imagerie cérébrale qui ont permis d'identifier les structures cérébrales qui dysfonctionnent dans les différents troubles dys et de démontrer que ce sont ces mêmes parties du cerveau qui modifient à la fois leur structure et leur fonctionnement sous l'effet d'un apprentissage musical. Enfin, la danse représente un champ encore quasiment inexploré, mais dont les applications potentielles sont considérables dans diverses pathologies développementales.

La musique facilite-t-elle les apprentissages scolaires ? un débat à l'issue encore incertaine

La pratique de la musique est depuis la plus haute antiquité préconisée pour parfaire l'éducation des enfants. Dans la Grèce antique, de nombreux écrits nous apprennent combien la question de l'apprentissage musical, même à un niveau non professionnel, était central au même titre que ceux de la langue, des mathématiques ou de la gymnastique. La musique était une des matières enseignées à tous les écoliers de la Cité et Platon et Aristote ont tous deux été d'ardents défenseurs de l'enseignement obligatoire de la musique. Pour autant, les vertus de la musique étaient perçues comme un facteur d'équilibre psychique plus que comme un appui à l'apprentissage.

Depuis la fin du siècle dernier, un ensemble de preuves s'est rapidement accumulé montrant des associations entre l'activité musicale et les compétences cognitives, notamment linguistiques, des enfants. Par exemple, des enfants musiciens de 7 à 9 ans ont surpassé leurs pairs non musiciens lorsqu'on leur demandait de détecter de petites différences d'intonation dans des phrases entendues¹ et montraient des réponses cérébrales améliorées sur la détection de déviations minimales de rapidité des consonnes et de durée des syllabes². Les compétences en prononciation de langues étrangères et la réponse cérébrale à de faibles déviations de durée (en musique et en parole) étaient meilleures chez les 10-12 ans ayant une formation musicale³. Même sans formation musicale explicite, une partie de la variabilité des compétences linguistiques peut être prise en compte en mesurant les différences individuelles dans les aptitudes musicales : ainsi, les mesures d'aptitude à la musique expliquaient plus de 40 % de la variance en lecture chez les enfants de 8 à 13 ans ayant peu ou pas de formation musicale⁴. De même, les compétences en perception du rythme étaient étroitement corrélées avec les compétences en grammaire chez des enfants de 6 ans⁵.

Parmi les compétences langagières, la lecture est certainement celle qui a fait l'objet du plus grand nombre d'études visant à mesurer l'effet positif de la musique sur son apprentissage. L'hypothèse la plus souvent mise en avant est celle d'une stimulation par la pratique musicale des capacités dites phonologiques, connues pour être le principal précurseur cognitif de l'apprentissage de la lecture. En d'autres termes, la musique, par ses caractéristiques proches de certains aspects de la parole, va contribuer à renforcer des processus de manipulation et de segmentation des sons de paroles, fournissant ainsi un bagage plus efficient à l'apprenti-lecteur. Ainsi, il a pu être démontré que les compétences en perception des tonalités et en

¹ Magne, C., Schön, D., and Besson, M. (2006). Musician children detect pitch violations in both music and language better than nonmusician children: behavioral and electrophysiological approaches. *J. Cogn. Neurosci.* 18, 199–211.

² Chobert, J., Francois, C., Velay, J. L., and Besson, M. (2014). Twelve months of active musical training in 8- to 10-year-old children enhances the preattentive processing of syllabic duration and voice onset time. *Cereb. Cortex* 24, 956–967.

³ Milovanov, R., Huotilainen, M., Esquef, P. A., Alku, P., Välimäki, V., and Tervaniemi, M. (2009). The role of musical aptitude and language skills in preattentive duration processing in school-aged children. *Neurosci. Lett.* 460, 161–165.

⁴ Strait, D. L., Hornickel, J., and Kraus, N. (2011). Subcortical processing of speech regularities underlies reading and music aptitude in children. *Behav. Brain Funct.* 7:44.

⁵ Gordon, R. L., Shivers, C. M., Wieland, E. A., Kotz, S. A., Yoder, P. J., and Devin McAuley, J. (2015). Musical rhythm discrimination explains individual differences in grammar skills in children. *Dev. Sci.* 18, 635–644.

rythme d'enfants de 4 et 5 ans étaient en corrélation avec la conscience phonologique et les compétences précoces en lecture⁶.

Une étude française portant sur un échantillon de grande taille (n = 695) a montré que la capacité des élèves de maternelle à reproduire les rythmes musicaux était très prédictive de leurs compétences en lecture de deuxième année de scolarité élémentaire⁷.

Deux méta-analyses^{8,9} de cet effet de la musique sur la lecture ont conclu à la probabilité d'un tel effet, mais ont aussi souligné la faiblesse méthodologique de beaucoup des études réalisées jusqu'alors, notamment le manque d'un groupe contrôle, c'est-à-dire un groupe de comparaison engagé dans une tâche non musicale qui soit suffisamment proche en termes d'implication de l'élève et de temps passé, par exemple une activité d'art visuel. Une autre question souvent mise en avant est celle de la randomisation, à savoir que si la sélection des groupes n'est pas faite « à l'aveugle », cela risque de biaiser les résultats en faveur d'un des groupes, notamment en raison de nombreux facteurs d'ordre culturel et social qui peuvent induire le choix de parents de proposer un enseignement musical à leur enfant. Enfin, le nombre d'études montrant un résultat positif décroît de manière significative si on exclut les études transversales (qui ont comparé des groupes de musiciens et non musiciens à un moment donné) pour ne conserver que les études longitudinales (celles qui mesurent les variables d'analyse avant et après une période d'apprentissage). Comme le montre la figure suivante, une méthodologie longitudinale s'affranchit à la fois de la question de la randomisation et de la question du biais lié à des facteurs non contrôlés.

⁶ Anvari, S. H., Trainor, L. J., Woodside, J., and Levy, B. A. (2002). Relations among musical skills, phonological processing, and early reading ability in preschool children. *J. Exp. Child Psychol.* 83, 111–130.

⁷ Dellatolas, G., Watier, L., Le Normand, M. T., Lubart, T., and Chevrie-Muller, C. (2009). Rhythm reproduction in kindergarten, reading performance at second grade, and developmental dyslexia theories. *Arch. Clin. Neuropsychol.* 24, 555–563.

⁸ Tierney, A., and Kraus, N. (2013a). Music training for the development of reading skills. *Prog. Brain Res.* 207, 209–241. doi: 10.1016/B978-0-444-63327-9.00008-4

⁹ Gordon RL, Fehd HM, McCandliss BD. Does **Music** Training Enhance Literacy Skills? A Meta-Analysis. *Front Psychol.* 2015 Dec 1;6:1777.

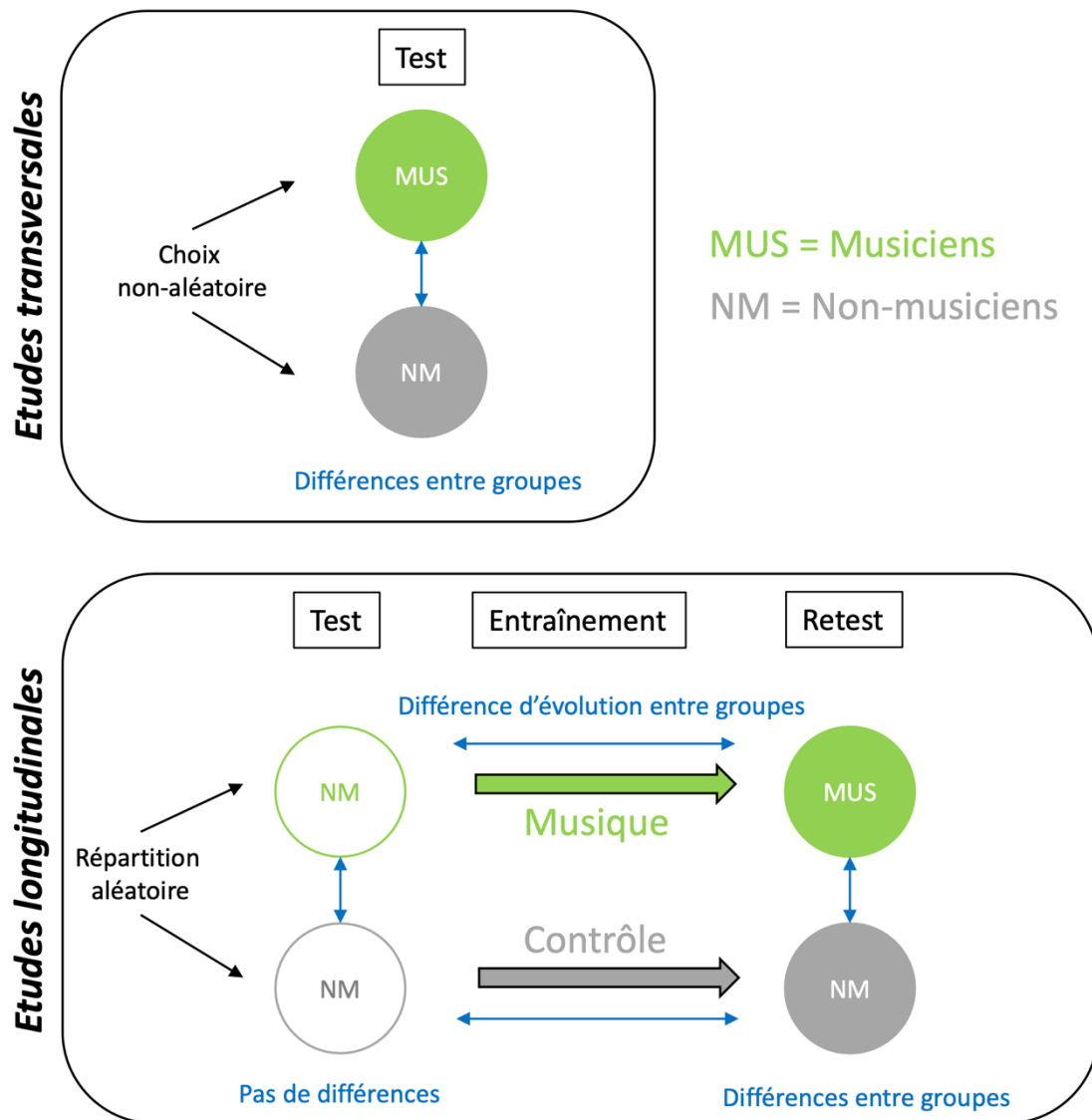


Figure 1 : considérations méthodologiques dans les études de l'effet de la musique sur les fonctions cognitives. Lors d'une étude transversale, lorsqu'est démontrée une supériorité d'un groupe d'enfants ayant fait de la musique avec un groupe non musicien, il est difficile de contrôler des facteurs comme la motivation des participants, le niveau d'implication de la famille, mais aussi les prédispositions génétiques éventuelles. Dans une étude longitudinale, au contraire, ces facteurs sont contrôlés d'une part par le fait que le protocole expérimental est construit de manière identique pour les deux groupes et d'autre part du fait que les deux groupes peuvent être choisis a priori pour être parfaitement identiques puisque les participants sont répartis de manière aléatoire. Mais bien entendu un protocole longitudinal est plus complexe à mettre en place et plus coûteux en temps et en implication humaine. D'après M. Barbaroux, 2019¹⁰.

Au-delà de la question spécifique de l'apprentissage de la lecture, c'est l'ensemble des fonctions cognitives, incluant les fonctions dites exécutives (inhibition, flexibilité, mémoire de travail...), jusqu'à la mesure de l'intelligence générale (le fameux QI) qui furent l'objet de travaux comparatifs entre enfants musiciens et non musiciens révélant presque à chaque fois une supériorité des musiciens¹¹. Une étude parfaitement contrôlée sur 48 enfants de 4-6 ans

¹⁰ Barbaroux M. Pratique musicale et effets de transfert : de la perception à la cognition . Thèse de Doctorat en Neurosciences. Aix-Marseille Université. 2019. <https://www.theses.fr/2019AIXM0552.pdf>

¹¹ Schellenberg, E. G. (2004). Music lessons enhance IQ. *Psychological Science*, 15(8), 511–514.

ayant bénéficié d'un entraînement de 20 jours, 45 minutes par jour à l'aide de deux programmes informatisés, l'un musical, l'autre d'art visuel, conçus pour l'occasion (parfaitement similaires en temps, nombre de sessions, difficulté attentionnelle) a montré qu'un entraînement musical d'à peine 20 jours est capable de modifier durablement les capacités de flexibilité mentale et d'intelligence verbale¹².

Ainsi, jusqu'à ces dernières années, il semblait se dégager un consensus en faveur d'un lien fort entre lecture et musique d'une part et apprentissage musical et capacités cognitives d'autre part, avec une forte présomption (mais un faible niveau de certitude toutefois) d'une relation de causalité entre les deux.

Plus récemment, plusieurs études ont émis des doutes sérieux, non seulement sur cette causalité, mais sur la véracité-même de la corrélation. Concernant le lien musique-lecture, il semble à l'analyse plus poussée des données disponibles que le lien avec la musique soit plus restreint qu'initialement présumé, à savoir un lien fort entre l'intensité de l'entraînement musical et la mesure de précurseurs phonologiques de la lecture alors que le lien avec la fluidité de lecture est faible ou inexistant⁹.

Concernant les effets de la musique sur d'autres aptitudes cognitives, des doutes importants ont également été formulés quant à la validité des conclusions des études antérieures¹³. Ces derniers auteurs concluent de manière assez drastique que « l'optimisme des chercheurs à l'égard des avantages de la formation musicale est empiriquement injustifié et découle d'une mauvaise interprétation des données empiriques et, possiblement, d'un biais de confirmation¹⁴ » (voir également¹⁵ pour une position plus tempérée !)

Le point de vue des neurosciences

Dans ce débat sur l'effet cognitif de la musique, explorer directement le cerveau et les modifications que provoque la musique sur son fonctionnement apparaît comme une démarche logique et apte à trancher certaines questions encore non résolues. De fait, les données de la littérature, rapportant les résultats de techniques variées de neuroimagerie, y sont riches et relativement concordantes.

Il est habituel de distinguer les modifications fonctionnelles et morphologiques, correspondant à deux modalités distinctes d'imagerie.

¹² Moreno S, Bialystok E, Barac R, Schellenberg EG, Cepeda NJ, Chau T. Short-term music training enhances verbal intelligence and executive function. *Psychol Sci.* 2011 Nov;22(11):1425-33.

¹³ Sala, G., Gobet, F. Cognitive and academic benefits of music training with children: a multilevel meta-analysis. *Mem Cognit.* 2020 Nov;48(8):1429-1441.

¹⁴ Un biais de confirmation est un biais cognitif (donc un comportement inconscient de la part du chercheur) qui consiste à privilégier les informations confirmant ses idées préconçues ou ses hypothèses, ou à accorder moins de poids aux hypothèses et informations jouant en défaveur de ses conceptions, ce qui se traduit par une réticence à changer d'avis.

¹⁵ Bigand, E., Tillmann, B., 2022. Near and Far Transfer: Is Music Special? *Memory & Cognition*, volume 50, pages 339–347

Les données de l'imagerie fonctionnelle.

Lorsqu'on examine le cerveau en fonction, comme le permet notamment l'IRM fonctionnelle (IRMf), on peut observer l'activation des différentes aires cérébrales lors de différentes tâches musicales proposées aux sujets d'expérience. Initialement, la plupart de ces travaux s'étaient attachés à mettre en parallèle les modifications produites par l'écoute musicale et celles produites par des activités langagières. Comme souvent en matière de recherche scientifique, le danger est alors de se focaliser sur les résultats allant dans le sens de l'hypothèse, en l'occurrence celle d'une similitude entre langage et musique.

C'est ainsi que le scientifique américain A. Patel, une figure de référence parmi les théoriciens actuels de la musique, a proposé un modèle dénommé OPERA, faisant l'hypothèse que la musique provoque sur le cerveau des transformations obéissant à 5 principes : le chevauchement des circuits impliqués dans les deux activités, (*Overlap*), la nécessité de plus de *Précision* pour traiter la musique que le langage, un contexte *Émotionnel* supplémentaire pour la musique, et la nécessité, pour les deux activités, de *Répétition* et focalisation de l'*Attention*. En bref, la formation musicale améliorerait le traitement de la parole et du langage parce qu'elle impose des exigences plus élevées aux réseaux neuronaux partagés, suscite des récompenses émotionnelles et exige la répétition et l'attention¹⁶.

En fait, l'assomption de similarité, qui a longtemps prévalu comme explication de l'effet de la musique sur le cerveau, stipulant que, de par leurs nombreuses caractéristiques communes, musique et langage devraient utiliser les mêmes circuits cérébraux, et que l'expertise et la pratique du premier doivent de ce fait nécessairement se prolonger par un bénéfice dans le second, est clairement mise en défaut par au moins deux ordres de faits. En premier lieu, la neurologie nous apprend que lorsqu'une personne souffre d'une lésion de l'hémisphère gauche et de ce fait va présenter un trouble du langage (aphasie) il ou elle ne va pas nécessairement perdre ses capacités musicales. Il existe même des cas célèbres de musiciens ayant pu continuer leur pratique avec une virtuosité intacte tout en ayant perdu les facultés de langage. L'interprétation en est que si les zones du langage sont quasi systématiquement localisées dans l'hémisphère gauche, expliquant pourquoi une affection de cet hémisphère provoque une aphasie, les capacités musicales, elles, sont traditionnellement reliées au fonctionnement de l'hémisphère droit, en particulier pour les aspects mélodiques. De surcroît cette différence est robuste et probablement constitutionnelle puisque des nouveau-nés de quelques jours activent différenciellement leurs hémisphères droit et gauche lorsqu'on leur présente des sons musicaux ou du langage, respectivement¹⁷. Au-delà de cette différence de représentation entre les hémisphères, des travaux plus récents ont mis en évidence de manière répétée une activation de zones différentes pour le langage et la musique dans le cortex auditif des deux hémisphères, et même une localisation différente lors de l'écoute de la voix chantée, en quelque sorte une condition intermédiaire entre la parole et la musique¹⁸.

¹⁶ Patel, A.D., 2011. Why would musical training benefit the neural encoding of speech? The OPERA hypothesis. *Front. Psychol.* 2, 142.

¹⁷ Perani D, Saccuman MC, Scifo P, Spada D, Andreolli G, Rovelli R, Baldoli C, Koelsch S. Functional specializations for music processing in the human newborn brain. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2010 Mar 9;107(10):4758-63.

¹⁸ Norman-Haignere SV, Feather J, Boebinger D, Brunner P, Ritaccio A, McDermott JH, Schalk G, Kanwisher N. A neural population selective for song in human auditory cortex. *Curr Biol.* 2022 Mar 28;32(6):1454-1455

Ainsi, les données les plus récentes en imagerie fonctionnelle vont nettement à l'encontre de l'idée prévalente que la musique modifierait notre cerveau par sa seule similitude avec la structure de la parole.

L'apport décisif de l'imagerie morphologique

Les preuves les plus convaincantes de l'effet de la musique sur notre cerveau proviennent en fait de données utilisant d'autres techniques d'imagerie, non plus celles montrant le cerveau en fonction, mais celles visualisant la structure elle-même dans sa morphologie. Les études initiales s'étaient centrées sur la mise en évidence de différences dans les régions motrices de la main, ou dans les régions auditives du cerveau. Par exemple, il a été montré¹⁹ que des joueurs d'instruments à cordes présentaient un plus fort développement de l'aire sensorimotrice des doigts de la main gauche (sur l'hémisphère droit) et que cet effet n'est pas présent chez les joueurs d'instruments à clavier, ni sur les violonistes ayant appris tardivement à jouer. Cela prouve que c'est bien l'exercice intensif de la motricité distale des doigts depuis la petite enfance qui a modifié la structure même de leur surface corticale. De la même manière, des travaux ont également montré que les aires auditives primaires et secondaires de l'hémisphère gauche de sujets musiciens, impliquées dans la perception auditive et dans l'affectation d'une signification musicale aux sons entendus, sont plus développées chez les musiciens que chez les non-musiciens²⁰.

Mais les modifications les plus spectaculaires sont celles observées sur la substance blanche des musiciens, grâce à des techniques d'IRM mesurant spécifiquement la structuration des faisceaux de connexion (IRM de diffusion ou DTI) : en premier lieu au niveau du *corps calleux*²¹, cette masse de fibres blanches unissant les zones corticales symétriques de l'hémisphère droit et de l'hémisphère gauche, plus développée chez les musiciens sans doute par le biais d'un exercice intensif de la coordination bimanuelle impliquant un passage d'informations entre les deux hémisphères.

Un autre important faisceau semble être la cible d'un apprentissage musical : le *faisceau arqué*, une masse de matière blanche qui traverse d'arrière en avant, sous la forme d'un arc de cercle, chacun des deux hémisphères, unissant les zones sensorielles, à l'arrière du cerveau, à celles de la motricité, dans le lobe frontal. Comme le montre la figure 2, un adulte ayant pratiqué un instrument durant toute sa vie a développé de manière bien plus conséquente ce faisceau qu'une personne de même âge et de même cursus mais non musicien.

19 Elbert, T., Pantev, C., Wienbruch, C., Rockstroh, B., Taub, E. (1995). Increased cortical representation of the fingers of the left hand in string players, *Science*, 270 : 305-307.

20 Schlaug, G. (2001) The brain of musicians: a model for functional and structural adaptation. *Ann. NY Acad. Sci.*, 930, 281–299.

21 Schlaug G., Jäncke L., Huang Y., et al. (1995a). Increased corpus callosum size in musicians. *Neuropsychologia* 33: 1047-1054.

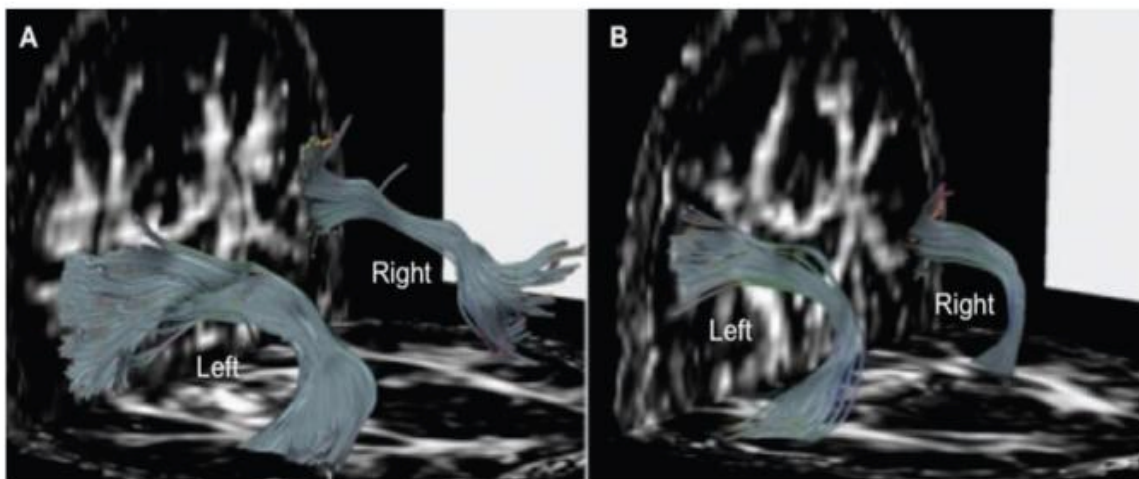


Figure 2 : comparaison de deux adultes âgés ayant l'un de nombreuses années de pratique d'un instrument de musique (à gauche), l'autre sans aucune expérience musicale. On voit nettement la différence de taille du faisceau arqué entre les deux, celui du musicien étant clairement beaucoup plus fourni en nombre et en épaisseur des fibres qui le constituent (d'après²²).

Cette constatation, qui a été répliquée dans plusieurs études, incite donc à penser qu'au-delà de son effet sculptant sur les aires corticales motrices et auditives, la pratique musicale a également, et peut-être surtout, modifié considérablement l'anatomie des *fibres unissant entre elles les régions de cortex concernées par l'usage d'un instrument ou la pratique professionnelle du chant*.

Or, ce même faisceau arqué est également la région de la substance blanche cérébrale sur laquelle ont été régulièrement décrites des modifications structurales chez les enfants et adultes dyslexiques. Cette coïncidence a été la première raison qui nous a incités à réfléchir sur la possibilité d'utiliser la musique dans le traitement de la dyslexie, comme cela sera détaillé plus loin.

Le cerveau du dyslexique est le siège de connexions singulières: vers une explication unitaire des troubles dys

L'enfant dyslexique peine à entrer dans les premières étapes de l'apprentissage de la lecture, ce qu'on dénomme la conversion grapho-phonémique, qui n'est pas autre chose que le banal B-A-BA. Cette étape cruciale repose sur l'intégrité de trois systèmes cérébraux qui doivent être disponibles avant toute tentative d'apprentissage : un système langagier général, qui s'est développé durant les premières années de la vie et a construit un bagage linguistique déjà

²² Wan C.Y. and Schlaug G. (2010). Music Making as a Tool for Promoting Brain Plasticity across the Life Span. *Neuroscientist*. 2010 October ; 16(5): 566–577.

sophistiqué ; une fonction cognitive particulière, la phonologie, qui est ni plus ni moins qu'une prise de conscience progressive par le petit enfant que les mots qu'il entend et qu'il utilise sont des entités, ayant leur signification, mais qui peuvent être segmentés en unités de plus petite taille : les syllabes, la rime, les phonèmes (la structure élémentaire, dont l'identification est la plus difficile et la plus tardive à se mettre en place) ; les capacités visuo-attentionnelles, enfin, qui assurent une attention sur les chaînes de lettres, sur leur forme générale, leur taille et qui va déterminer ensuite les processus qui se mettront en place pour assurer une fluidité et une rapidité croissante dans l'acte de lecture. Les zones du cerveau qui sont impliquées dans ces différentes tâches sont en grande partie communes avec celles impliquées dans le langage oral, dont la fameuse aire de Broca, sur la partie basse et latérale du lobe frontal gauche, qui, outre son rôle dans la production du langage oral, va jouer un rôle majeur dans l'acquisition de l'écrit, notamment sous la forme d'un processeur phonologique, c'est-à-dire une sorte de plaque tournante entre la forme sonore des mots entendus, leur production articulo-phonatoire et leur segmentation pour préparer leur mise en relation avec le code écrit (également appelé code orthographique).

C'est ainsi que plusieurs équipes distinctes ont développé l'idée que le trouble pourrait se situer de manière plus générale au niveau de l'incapacité du cerveau du dyslexique à faire coïncider des stimuli de nature différente, comme par exemple l'image visuelle d'une lettre (graphème) et son correspondant sonore (phonème), mais aussi à les mettre en relation avec le processeur phonologique de l'aire de Broca. L'une de ces études, émanant d'une équipe flamande²³, a précisément permis de mettre en évidence deux circuits dans l'hémisphère gauche qui sont incorrectement câblés sur le cerveau de dyslexiques : un circuit supérieur, empruntant le faisceau arqué et dont l'intégrité garantit l'efficacité de la voie phonologique de lecture (lire par les sons), et l'autre inférieur, empruntant le faisceau occipito-frontal et dont le bon fonctionnement assurerait l'accès direct des mots à leur orthographe et à leur sens (*figure 3*). En outre, le caractère atypique de ces circuits serait déjà présent avant l'âge d'acquisition de la lecture chez des enfants de maternelle à risque de dyslexie, ce qui semble prouver que l'anomalie en question n'est pas la simple conséquence d'une trop faible familiarité avec le langage écrit²⁴, même si des facteurs éducatifs peuvent également influencer l'anatomie des faisceaux concernés²⁵.

²³ Vandermosten, M., Boets, B., Poelmans, H., Snaert, S., Wouters, J., & Ghesquière, P. (2012). A tractography study in dyslexia: Neuroanatomic correlates of orthographic, phonological and speech processing. *Brain*, 135(3), 935–948.

²⁴ Langer N, Peysakhovich B, Zuk J, Drottar M, Sliva DD, Smith S, Becker BL, Grant PE, Gaab N. White Matter Alterations in Infants at Risk for Developmental Dyslexia. *Cereb Cortex*. 2017 Feb 1;27(2):1027-1036. doi: 10.1093/cercor/bhv281.

²⁵ Vandermosten M, Cuyenen L, Vanderauwera J, Wouters J, Ghesquière P. White matter pathways mediate parental effects on children's reading precursors. *Brain Lang*. 2017 Oct;173:10-19. doi: 10.1016/j.bandl.2017.05.002. Epub 2017 May 27.

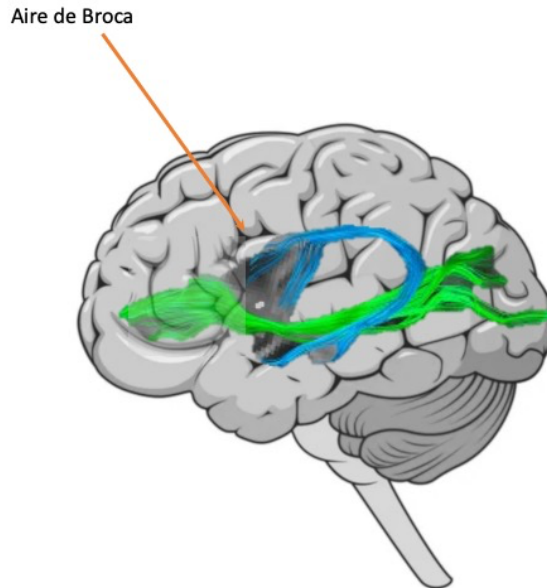


Figure 3 : Les deux principaux faisceaux de substance blanche régulièrement rapportés comme anormalement structurés chez les enfants dyslexiques : faisceau arqué (en bleu), faisceau occipito-frontal inférieur (en vert), par transparence sur une vue d'hémisphère gauche du cerveau. D'après Vandermosten et al., 2012, 2017

Restaurer la connectivité à l'intérieur du cerveau : la mission secrète de la musique et de la danse

Si le mécanisme intime à l'origine de la dyslexie est bien, comme le montrent à présent un faisceau largement convergent de preuves de diverse nature, un défaut de connectivité entre les zones cérébrales chargées de l'articulation de la parole et celles en charge de la représentation auditive et visuelle du code langagier, dès lors il devient pertinent de rechercher dans ce mécanisme l'explication de l'effet si souvent avancé de la musique sur les apprentissages, notamment celui de la lecture.

Une des caractéristiques de la plasticité cérébrale, c'est-à-dire la capacité du cerveau à se restructurer sous l'influence d'un exercice régulier ou d'un apprentissage, c'est de requérir la mise en jeu simultanée de plusieurs modules cérébraux assurant des fonctions différentes.

On sait depuis plus d'un demi-siècle, précisément depuis les travaux du neurologue canadien Donald Hebb, que lorsque deux systèmes cérébraux distants sont activés de manière simultanée et répétée, les connexions entre les deux systèmes vont se renforcer progressivement et aboutir à une plus grande efficacité synaptique au niveau des neurones de ces systèmes. Tout laisse penser que les phénomènes observés lors d'apprentissage sensorimoteur en général, et lors de celui d'un instrument de musique en particulier, reposent sur un mécanisme de ce type, définissant un type de plasticité cérébrale que l'on peut qualifier d'intermodalitaire ou multimodal.

On comprend ainsi que le caractère multimodal de l'apprentissage musical puisse être un élément crucial de l'effet de cet apprentissage sur le cerveau et que l'entraînement de plusieurs

modalités simultanément soit plus efficace à cet égard que ne le serait un entraînement séparé de ces modalités²⁶.

Lorsqu'un musicien apprend à jouer de son instrument, il apprend à associer de manière synchrone le mouvement avec la perception et/ou la représentation du son correspondant, ce qui lui permet de vérifier que le son émis répond bien à celui qui était programmé. Des signaux émis par le cortex préfrontal sont capables d'activer le cortex auditif, même en l'absence de son correspondant. À l'inverse, des représentations motrices seraient actives, même en l'absence de production du mouvement correspondant, ce qui permettrait l'anticipation indispensable à la pratique experte d'un instrument. Il a été montré qu'un entraînement à jouer au clavier augmente les coactivations auditivo-motrices après seulement 20 minutes de pratique. Il est très probable que l'intensification des liens entre les différentes régions cérébrales puisse être bénéfique à un apprentissage, comme celui de la lecture, qui nécessite précisément la pratique répétée et précise de ces liens.

Mais ce qui est valable pour la lecture (et donc pour la dyslexie) l'est probablement aussi pour toute autre condition qui reposerait également sur un défaut de connectivité entre des régions distantes du cerveau.

Cela a été démontré, par exemple, chez les personnes dyscalculiques, chez qui font défaut les mécanismes de base de la représentation des quantités afférentes aux nombres et nécessaires à l'apprentissage des mathématiques. Chez ces personnes, l'imagerie des faisceaux de matière blanche permet de présumer que les codes verbal oral et écrit désignant les nombres ne peuvent être transformés en un concept abstrait de quantité (« sens du nombre») en raison d'une connectivité affaiblie entre les régions fronto-temporales de l'hémisphère gauche et les zones pariétales de la représentation spatiale de la « ligne numérique ».

Chez les personnes souffrant de dysgraphie, dont le trouble est une difficulté d'apprentissage du geste nécessaire à la réalisation graphique des lettres et des mots, ce sont les aires du langage et les zones motrices qui ont été retrouvées imparfaitement connectées. Dans ces deux cas, on peut donc concevoir le trouble comme une dysconnectivité entre un module linguistique et un autre module, celui de la représentation abstraite des quantités pour la dyscalculie, et celui de la représentation des gestes moteurs d'écriture pour la dysgraphie.

Des connexions aux oscillations : une question de tempo

On peut dès lors s'interroger sur le mécanisme intime de cet effet présumé délétère d'un développement atypique des connexions au sein du cerveau sur l'apprentissage de la lecture, et au-delà de la dyslexie sur le développement d'autres fonctions cognitives, comme le calcul, l'écriture, l'attention, voire des fonctions psychologiques plus complexes comme celles impliquées dans l'autisme. Une piste très convaincante, et du reste particulièrement utile à la

²⁶ Zatorre, R. J., Chen, J. L., Penhune, V. B. (2007). When the brain plays music : auditory-motor interactions in music perception and production. *Nat Rev Neurosci*, 8(7), 547-558.

réflexion sur les stratégies thérapeutiques, a été apportée par une série de travaux ayant analysé le rythme des oscillations corticales dans différentes régions du cerveau. On sait en effet que l'activité électrique du cerveau peut se décomposer sous la forme d'oscillations régulières de rythmes différents se superposant dans une région corticale donnée. Une hypothèse aujourd'hui bien documentée soutient que ces rythmes oscillatoires corticaux, au moins dans les régions spécialisées dans le langage, vont s'aligner temporellement sur les rythmes de la parole pour permettre le décodage de ses différentes composantes, depuis l'enveloppe prosodique générale de la phrase pour les plus lents (rythme delta) jusqu'aux transitions phonémiques (rythme gamma) pour les plus rapides.

Plus généralement, une telle synchronisation pourrait également présider aux relations de communication entre différentes zones cérébrales, et, en cas d'anomalie empêcher les parties du cerveau de communiquer entre elles. Selon ce modèle, appelé PRISM ou "*processing rhythm in speech and music*" (figure 4), un lien étroit entre les régions motrices et sensorielles du cerveau permettrait aux différentes zones impliquées, organisées de manière hiérarchique en fonction du rythme de leurs oscillations spécifiques (les plus rapides étant entraînées par les plus lentes), d'entrer en connexion réciproque par l'intermédiaire, précisément, des connexions anatomiques qui les unissent.

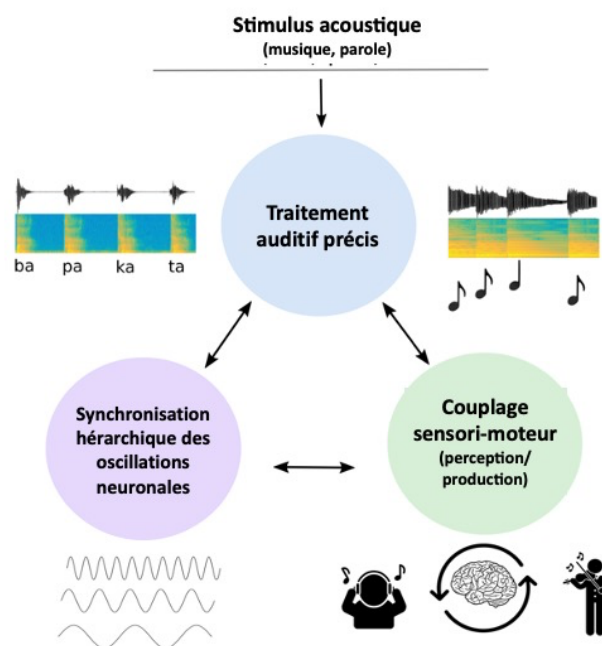


Figure 4 : le Modèle PRISM établit un lien théorique entre deux constats fondamentaux : la force des relations entre les régions sensorielles et motrices du cerveau, dont témoignent de nombreuses preuves expérimentales de collaborations entre les deux domaines fonctionnels (notamment au cours de l'apprentissage) et d'autre part l'organisation des oscillations neuronales dont la synchronisation avec les caractéristiques des stimuli auditifs (musique ou parole) permet la prédiction des éléments à venir et la structure hiérarchique permet leur propagation entre différentes aires corticales. d'après Fiveash, A. *et al.*, 2021, *Neuropsychology*, 35(8), 771-791

Chez l'enfant ou l'adulte dyslexique, le défaut structurel des connexions de substance blanche intra-cérébrale serait à l'origine d'une perte de cette organisation hiérarchique des comportements oscillatoires qui déterminent la précision temporelle des différentes

informations que le cerveau doit traiter pour assurer l'apprentissage de la lecture et d'autres acquisitions.

En définitive, tout se passe comme si le déficit, chez le dyslexique, était la manifestation d'une dysconnectivité entre différentes régions corticales associée à (ou en relation causale avec) un défaut de synchronisation de l'activité oscillatoire des groupes de neurones en réponse à des stimuli auditifs de basse fréquence. Les déplacements oculaires lors de la lecture seraient également la conséquence ou la covariable d'oscillations lentes du cortex visuel qui pourraient aussi participer de la dysfonction chez le dyslexique, chez qui ces oscillations, par leur caractère erratique, génèreraient un défaut dans la prise d'informations visuelles lors de l'acte de lecture, donnant une véritable dimension multimodale au trouble de la lecture, à la fois défaut de synchronisation des processus phonologiques et des processus de coordination visuo-oculaire²⁷.

La pratique musicale pourrait dès lors fort bien agir précisément sur le cerveau des dyslexiques en favorisant à la fois la connectivité et la cohérence temporelle entre des régions de cortex qui peinent à communiquer entre elles. Des exercices de lecture rythmique, où les sessions de lecture sont scandées par le rythme musical ont été proposés avec succès. Le but de l'entraînement est de lire des syllabes, mots ou phrases au rythme de la musique jouée en fond sonore. Au cours de l'entraînement, le rythme de la musique s'accélère, augmentant ainsi la difficulté de la tâche. Utilisé chez des collégiens dyslexiques pendant 9 séances individuelles bihebdomadaires de 30 minutes, le programme a été suivi d'une amélioration de la lecture, tant en rapidité qu'en exactitude²⁸.

Dans une perspective un peu différente, relevant de ce qu'on appelle une technique d'amorçage, une équipe lyonnaise^{29, 30} a proposé à des enfants dyslexiques et dysphasiques une tâche où ils devaient écouter une amorce rythmique (des notes jouées par un instrument à percussion) soit réalisant une succession régulière, soit irrégulière, et juste après l'amorce devaient résoudre un problème de congruité syntaxique comme dire si une phrase (e.g. « Laura ont oublié son violon ») est correcte ou non. Les résultats montrèrent une nette supériorité de l'amorce régulière sur la performance des enfants dans la tâche syntaxique, ce qui, d'après les auteurs, procure un argument convaincant pour inclure la stimulation rythmique dans les protocoles de remédiation des enfants avec troubles développementaux du langage.

Nous inspirant de ces résultats, nous avons, avec notre équipe d'orthophonistes, utilisé le protocole Mélodys® (*vide infra*) pour aider à la rééducation d'un groupe d'enfants dyslexiques

²⁷ Vidyasagar TR. Visual attention and neural oscillations in reading and dyslexia: are they possible targets for remediation? *Neuropsychologia*. 2019;130:59–65.

²⁸ Bonacina, S., Cancer, A., Lanzi, P. L., Lorusso, M. L., & Antonietti, A. (2015). Improving reading skills in students with dyslexia: The efficacy of a sublexical training with rhythmic background. *Frontiers in Psychology*, 6, 1-8.

²⁹ Przybylski L, Bedoin N, Krifi-Papoz S, Herbillon V, Roch D, Léculier L, Kotz SA, Tillmann B. (2013). Rhythmic auditory stimulation influences syntactic processing in children with developmental language disorders. *Neuropsychology*, 27(1):121-31.

³⁰ Bedoin, N., Brisseau, L., Molinier, P., Roch, D. et Tillmann, B. (2016). Temporally regular musical primes facilitate subsequent syntax processing in children with Specific Language Impairment. *Frontiers in Neuroscience*, 10, 245.

scolarisés dans une classe spéciale d'un établissement scolaire public de l'Académie d'Aix-Marseille. Les élèves de cette classe étaient tous sévèrement dyslexiques, ayant par ailleurs des difficultés associées dans le calcul, l'attention, et la coordination motrice. Les résultats ont permis d'affirmer un bénéfice significatif sur la lecture, l'attention auditive et la conscience phonologique³¹.

Récemment, une équipe italo-française³², dans une étude méticuleuse de 83 enfants dyslexiques, ont comparé l'effet d'un entraînement rythmique systématique à une pratique d'arts visuels. Au cours de sessions de formation impliquant des groupes de 5-6 enfants, durant une heure, deux fois par semaine, les enfants se voyaient proposer soit un entraînement musical: mettre l'accent sur le rythme et le traitement temporel (utilisation par exemple des instruments à percussion, utilisation des syllabes rythmiques [ta, ti-ti,...], des mouvements rythmiques du corps accompagnant la musique, des jeux de synchronisation sensorimotrice); soit un entraînement à la peinture, selon un programme destiné à favoriser les compétences visuo-spatiales et la dextérité manuelle ainsi que la créativité. Les résultats ont été très nets, montrant un effet plus important de l'entraînement musical sur un test d'attention auditive et dans plusieurs capacités de perception et de production telles que testées par des tâches psychoacoustiques et musicales.

Ainsi, une stimulation rythmique telle que celle d'un métronome, d'un morceau de percussions, et plus généralement d'une musique, pourrait posséder une vertu curative sur les dysfonctionnements induits par le défaut de connectivité caractéristique de la dyslexie, et par extrapolation pourraient être utilisées dans d'autres troubles du neurodéveloppement. Un certain nombre d'observations récentes viennent l'appuyer de ce raisonnement.

[Le rythme et la musique comme médication des « connectopathies » développementales](#)

Une de ces études³³ a été menée par des chercheurs canadiens de l'Université de Montréal et de l'Université McGill qui travaillaient avec des pré-adolescents autistes dont les troubles de la communication ont été mesurés avant et après une session de quelques semaines de pratique musicale intensive. Pendant trois mois, 51 enfants de 6 à 12 ans ont suivi une thérapie basée sur la pratique musicale de 45 minutes. A l'issue de cette période, les parents des enfants, impliqués dans l'étude, ont constaté une amélioration dans la communication, et par conséquent dans la

³¹ Habib, M., Lardy, C., Desiles, T., Commeiras, C., Chobert, J., & Besson, M. (2016). Music and Dyslexia: A New Musical Training Method to Improve Reading and Related Disorders. *Front. Psychol.* 7:26.

³² Flaugnacco, E., Lopez, L., Terribili, C., Montico, M., Zoia, S. et Schön, D. (2015). Music Training Increases Phonological Awareness and Reading Skills in Developmental Dyslexia: A Randomized Control Trial. *Plos One*, 10(9).

³³ Sharda M, Tuerk C, Chowdhury R, Jamey K, Foster N, Custo-Blanch M, Tan M, Nadig A, Hyde K. Music improves social communication and auditory-motor connectivity in children with autism. *Transl Psychiatry*. 2018 Oct 23;8(1):231.

vie familiale, par rapport à un deuxième groupe qui lui a suivi une prise en charge basée sur le jeu qui n'incluait pas la musique, mais réalisée par la même expérimentatrice pour limiter les effets de facteurs non souhaités, comme la motivation, ou un biais lié à la nature de l'interaction avec les jeunes patients.

Ces résultats ont été ensuite mis en perspective avec les images de l'IRM, réalisées avant et après l'expérience. Les images ont montré une meilleure connectivité entre les régions motrices et auditives du cerveau impliquées dans les interactions sociales, notamment le cortex auditif et les zones sous-corticales et ce uniquement pour les enfants ayant bénéficié de l'intervention musicale.

Dans la même veine, une étude³⁴ a comparé deux groupes d'adolescents autistes, ayant ou non réalisé un apprentissage de percussions (cours de batterie en tête à tête à raison de 2 par semaine durant 8 semaines) : il est ici démontré que le groupe ayant appris à jouer de la batterie améliore significativement les symptômes d'hyperactivité et d'inattention, et augmente la connectivité entre des régions frontales médianes et sous corticales (système de la récompense) sur des IRM. Ainsi, plusieurs auteurs ont proposé de parler de « connectopathie ³⁵ » ou d' « oscillopathie ³⁶ » pour qualifier cet ensemble de conditions pathologiques, s'étendant depuis la dyslexie jusqu'aux troubles du spectre autistique, pour souligner leur parenté à la fois du point de vue du défaut de connectivité de différentes zones cérébrales (variables, bien entendu, selon le domaine altéré des fonctions cognitives) mais dans lesquels un autre point commun pourrait être une singularité des relations de synchronie oscillatoire des réseaux neuronaux concernés.

La musique et la danse : un nouvelle arme dans l'arsenal thérapeutique des troubles du neurodéveloppement

Une fois admise la constatation d'un effet incontestable de la musique sur le cerveau, on peut raisonnablement se demander, dans une perspective thérapeutique, quels peuvent être les ingrédients les plus indispensables pour que cet effet se manifeste. C'est la question que nous nous sommes posés dans notre groupe à Marseille dans l'élaboration du programme

³⁴ Cahart MS, Amad A, Draper SB, Lowry RG, Marino L, Carey C, Ginestet CE, Smith MS, Williams SCR. The effect of learning to drum on behavior and brain function in autistic adolescents. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2022 Jun 7;119(23):e2106244119.

³⁵ Yamasaki T, Maekawa T, Fujita T, Tobimatsu S. Connectopathy in Autism Spectrum Disorders: A Review of Evidence from Visual Evoked Potentials and Diffusion Magnetic Resonance Imaging. *Front Neurosci*. 2017 Nov 9;11:627

³⁶ Jiménez-Bravo M, Marrero V, Benítez-Burraco A. An oscillopathic approach to developmental dyslexia: From genes to speech processing. *Behav Brain Res*. 2017 Jun 30;329:84-95.

Mélodys®³⁷. Deux principes sont considérés comme fondamentaux : la plurimodalité et la composante motrice.

La plurimodalité: une variable cruciale pour un effet optimal de la musique sur le cerveau

La nécessité de plurimodalité est directement inspirée de l'analyse de la littérature telle que rapportée ci-dessus, notamment la potentialisation souvent soulignée de l'effet sur les faisceaux de connexion lorsqu'est présente une composante visuelle. Par exemple, une étude en IRM de diffusion a permis de démontrer le renforcement structurel du faisceau arqué après 4 semaines de pratique d'un exercice où les sujets devaient associer le déplacement sur un écran d'une cible avec le rythme d'un métronome en répondant à l'aide d'un des 4 doigts de la main gauche selon une séquence aléatoire. La combinaison dans cette tâche d'une composante motrice, visuelle et auditive procure ici tous les ingrédients garantissant un effet rapide et massif sur les circuits de matière blanche impliqués dans la tâche. La stimulation visuelle synchrone du rythme entendu évoque clairement la situation de lecture musicale, où l'apprenti musicien doit apprendre à associer le son produit avec la position de la note sur la portée. Dans nos exercices, nous incluons systématiquement une notation simplifiée (segments de lignes horizontaux sur trois hauteurs différentes, par exemple, pour représenter une mélodie sur trois hauteurs de tons, ou de longueur différente, pour représenter des durées différentes). L'utilisation d'un clavier ou des lames d'un carillon offre en outre un retour visuel qui favorise encore l'association auditivo-visuelle, et, selon le même principe de plurimodalité, renforce probablement la connectivité entre les régions cérébrales.

Rythme et motricité : un principe actif systématiquement recherché

Au sein de cette plurimodalité, la composante motrice possède à l'évidence un rôle majeur. Un protocole expérimental très élégant a été réalisé à cet égard par une équipe germano-canadienne³⁸ qui a eu l'idée d'enregistrer par la magnéto-encéphalographie ou MEG (une méthode non invasive d'exploration de l'activité du cerveau) l'effet sur les mécanismes de perception auditive d'un apprentissage auditivo-moteur, comparé à un apprentissage seulement auditif. Pour ce faire, ils ont demandé à la moitié de leurs sujets d'expérience, novices non musiciens, d'apprendre le doigté d'une mélodie, et l'activité magnétique de leur cortex auditif était réenregistré après deux semaines d'apprentissage. L'autre moitié des sujets écoutaient passivement les leçons que recevaient les premiers, dont ils partageaient donc toutes les informations sensorielles (auditives et visuelles) mais pas l'expérience motrice. Le groupe sensorimoteur a modifié considérablement le potentiel évoqué par l'écoute de la mélodie

³⁷ Habib M., Commeiras C. *Mélodys, Remédiation cognitivo-musicale des troubles de l'apprentissage*. Paris-Bruxelles, DeBoeck ed., octobre 2014

³⁸ Pantev, C., Oostenveld, R., Engelien, A., Ross, B., Roberts, L. E., Hoke, M. (1998). Increased auditory cortical representation in musicians. *Nature*, 392, 811-814.

apprise, alors que le groupe témoin ne l'avait pas modifié. En d'autres termes, la participation motrice impliquée par le mouvement des doigts, associée dans le groupe expérimental à l'écoute de la mélodie, a influé de façon déterminante sur la façon dont le cortex auditif des participants a perçu la mélodie apprise.

Cette relation étroite entre la perception auditive et la production motrice a été largement étudiée chez les enfants et adultes dyslexiques, chez qui il est démontré de longue date la fréquence de difficultés d'intégration audio-motrice. En fait, un lien fort entre les capacités de reproduction de rythme et la qualité de l'apprentissage de la lecture a été démontré à de nombreuses reprises, et ce avant même l'âge de l'apprentissage lui-même³⁹. La plus ancienne évocation de ce problème chez le dyslexique remonte aux travaux de la psychologue française Mira Stambak qui a la première mis au point un test, encore utilisé largement en France dans les cabinets d'orthophonie et de psychomotricité, de reproduction motrice de rythmes entendus⁴⁰. Un déficit à ce test est souvent mis en évidence chez les dyslexiques mais l'explication de ce constat fait encore l'objet de débats. Les travaux les plus récents s'orientent vers une analyse fine de la notion de timing, c'est-à-dire la capacité du cerveau à transformer une succession de sons ou une durée en un geste moteur correspondant, une transformation typiquement impliquée dans tout geste musical. De manière générale, le dyslexique a souvent de la peine à adapter un tapping moteur au tempo d'un métronome, et surtout fait plus d'erreurs que les sujets témoins lors de changement du tempo⁴¹. Ce défaut de synchronisation audio-motrice a été également analysé avec du matériel verbal, et une hypothèse forte a été avancée par l'équipe anglaise d'Usha Goswami qui a démontré que ce déficit est proportionnel au trouble de la lecture⁴² et suggéré qu'il se situerait au niveau de la perception de la montée rapide initiale (« rise time ») qui caractérise l'enveloppe prosodique de la parole⁴³. En fait, les études les plus récentes s'orientent plutôt vers un trouble plus général du traitement du temps par le cerveau, volontiers appelé « dyschronie », attribuable à un défaut d'un système d'« horloge interne » dont on commence à comprendre le mécanisme (pour une revue de cette vaste question, voir⁴⁴).

Une étude française⁴⁵ a ainsi pu rapporter le déficit temporel du dyslexique à une insuffisance dans le traitement implicite, c'est-à-dire à un niveau totalement non conscient, de la durée de

³⁹ Woodruff Carr K., White-Schwoch T., Tierney A. T., Strait D. L., Kraus N. (2014). Beat synchronization predicts neural speech encoding and reading readiness in preschoolers. *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A* 111, 14559–14564.

⁴⁰ Stambak, M. (1951). Le problème du rythme dans le développement de l'enfant et dans les dyslexies d'évolution. *Enfance*, 4(5), 480-502

⁴¹ Wolff P.H. Timing precision and rhythm in developmental dyslexia. *Read. Writ.* 2002;15:179–206.

⁴² Thomson, J.M., Goswami, U. Rhythmic processing in children with developmental dyslexia: Auditory and motor rhythms link to reading and spelling. *Journal of Physiology* **2008**, 102, 120-129.

⁴³ Leong V., Hamalainen J., Soltész F., Goswami U. Rise time perception and detection of syllable stress in adults with developmental dyslexia. *J. Mem. Lang.* 2011;64:59–73

⁴⁴ Habib, M. The Neurological Basis of Developmental Dyslexia and Related Disorders: A Reappraisal of the Temporal Hypothesis, Twenty Years on. *Brain Sci.* **2021**, 11, 708.

⁴⁵ Casini, L., Pech-Georgel, C., Ziegler, J.C. It's about time: revisiting temporal processing deficits in dyslexia. *Dev Sci.* **2018** Mar, 21(2).

stimuli. Il s'agissait d'une tâche implicite de perception de la parole, dans laquelle les participants recevaient dans des écouteurs deux mots, 'cache' (/kaʃ /) ou 'cage' (/kaʒ/), pour lesquels la consonne finale était remplacée par un bruit blanc, créant des paires minimales qui ne différaient que par la longueur de la voyelle, une distinction que l'oreille ne fait pas spontanément, mais que le cerveau, lui, est capable de faire. Dans cette tâche, les dyslexiques ont perçu / kaʃ / le plus souvent et ont donc sous-estimé les durées par rapport aux enfants du même âge. Ce qui est intéressant avec ce résultat, c'est qu'il attire l'attention sur des mécanismes totalement implicites, qui ne font à aucun moment appel à la perception consciente du stimulus auditif. Dans leur conclusion, les auteurs de ce travail insistent sur les implications thérapeutiques de ce résultat, suggérant que l'efficacité de la musique et/ou du rythme dans le traitement de la dyslexie reposerait sur le « haut degré de précision que la musique impose en matière de timing audio-moteur ».

En résumé, une thérapie musicale des troubles du neurodéveloppement doit posséder les trois caractéristiques suivantes, outre celles inhérentes à toute thérapie visant à rééduquer des systèmes cérébraux déficitaires : être basée sur la *multimodalité*, c'est-à-dire utiliser conjointement au moins les deux principaux systèmes sensoriels, l'audition et la vision, et simultanément la sortie motrice en synchronie avec les éléments perceptifs ; contenir une information *rythmique*, qu'il s'agisse d'un rythme régulier (pulsation) ou d'une variation de ce rythme comme cela est présent dans divers extraits musicaux ; et enfin offrir aussi souvent que possible une *composante motrice*, qu'il s'agisse d'un geste sur un instrument, sur le corps lui-même (percussions corporelles), ou, bien entendu, la voix qui est en soi à la fois un instrument et un acte moteur. Dans tous les cas, la pratique d'un instrument de musique possède indubitablement un effet nettement curatif sur les caractéristiques de divers troubles du neurodéveloppement, avec, par analogie avec un médicament, un excipient, la pratique artistique dans son ensemble, et un principe actif qui peut en être extrait pour construire des outils de remédiation⁴⁶.

Musique, neurones miroirs et cognition sociale

Enfin, parallèlement à ces trois types d'effets, la musique possède bien entendu des vertus potentiellement thérapeutiques par sa capacité *d'activation du réseau émotionnel*⁴⁷, et tout particulièrement un noyau situé dans la profondeur du cerveau, le noyau accumbens (striatum ventral ou limbique), qui s'active dans diverses conditions musicales, en particulier sous l'influence de caractéristiques rythmiques. Cet effet crucial du rythme sur les circuits émotionnels se manifeste également dans toute une série d'études ayant mesuré l'effet de la musique dans le domaine des comportements pro-sociaux de l'adulte et de l'enfant, montrant

⁴⁶ Commeiras C., Dormoy A., Habib M. Musique et dyslexie : Mélodys®, un exemple de remédiation cognitivo-musicale des troubles dys. In : Remédiation orthophonique par la musique (**Chapitre 6**). Sous la direction de F. Estienne, T. de Barelli. Paris-Bruxelles , DeBoeck Ed. 2019, pp. 115-131.

⁴⁷ Koelsch S. Brain correlates of music-evoked emotions. Nat Rev Neurosci. 2014 Mar;15(3):170-80.

par exemple que les enfants utilisent la synchronie interpersonnelle comme indice pour orienter leurs comportements sociaux⁴⁸. Cette littérature n'est pas sans évoquer la notion de *système des neurones miroirs*, souvent mise en avant comme un des substrats de la façon dont la musique impacte notre cerveau émotionnel⁴⁹, en particulier la notion de partage d'information musicale, inhérente à la pratique de groupe, mais aussi partage entre un musicien et un auditeur. La mise en synchronie de réseaux de neurones, sans doute superposables au système des neurones miroir, entre plusieurs individus impliqués dans la réalisation et/ou l'écoute de la musique, pourrait ainsi exercer des circuits qui sont par ailleurs impliqués dans des compétences sociales comme l'empathie, la théorie de l'esprit ou les comportements altruistes.

A cet égard, les activités de danse, bien que beaucoup moins étudiées dans la littérature neuroscientifique dans l'indication des troubles du neurodéveloppement, font l'objet d'un intérêt tout particulier pour l'apport supplémentaire qu'elles procurent, celui de l'activité de groupe et ses bénéfices de mieux en mieux reconnus sur certaines fonctions cognitives, notamment celles reliées aux interactions sociales^{50, 51, 52}. Des études sur des primates non humains utilisant des enregistrements unitaires de neurones ont montré que lors de situation d'attention prêtée à des stimuli tactiles, comme c'est le cas en danse, la synchronie neuronale augmente dans les zones corticales sensorielles⁵³. Il a également été démontré que les tâches d'attention somatique chez les humains accroissent le couplage intra-cerveau dans la bande gamma entre le cortex frontal et les régions pariétales chargées d'intégrer les informations sensorielles. Une hypothèse séduisante schématisée sur la figure 5 stipule qu'un mécanisme similaire présiderait à la structuration par la danse de la synchronie intra-cerveau, et inter-cerveaux, à savoir la mise en résonance de l'activité oscillatoire de plusieurs zones du cortex d'un individu, mais aussi de ces mêmes zones entre plusieurs individus engagés dans une activité commune. Une telle représentation pourrait du reste tout aussi bien s'appliquer à la musique et fournit, en tout cas, des pistes passionnantes tant pour la recherche fondamentale que pour des projets de protocoles thérapeutiques basés sur ces approches.

⁴⁸ Cirelli LK, Trehub SE, Trainor LJ. [Rhythm and melody as social signals for infants](#). Ann N Y Acad Sci. 2018 Mar 7. doi: 10.1111/nyas.13580.

⁴⁹ Molnar-Szakacs, I., & Overy, K. (2006). Music and mirror neurons: From motion to 'e'motion. Social Cognitive and Affective Neuroscience, 1, 235-241.

⁵⁰ Karpati FJ, Giacosa C, Foster NE, Penhune VB, Hyde KL. Dance and the brain: a review. Ann N Y Acad Sci. 2015 Mar;1337:140-6.

⁵¹ DeJesus BM, Oliveira RC, de Carvalho FO, de Jesus Mari J, Arida RM, Teixeira-Machado L. Dance promotes positive benefits for negative symptoms in autism spectrum disorder (ASD): A systematic review. Complement Ther Med. 2020 Mar;49:102299.

⁵² Basso JC, Satyal MK, Rugh R. Dance on the Brain: Enhancing Intra- and Inter-Brain Synchrony. Front Hum Neurosci. 2021 Jan 7;14:584312.

⁵³ Steinmetz, P. N., Roy, A., Fitzgerald, P. J., Hsiao, S. S., Johnson, K. O., and Niebur, E. (2000). Attention modulates synchronized neuronal firing in primate somatosensory cortex. *Nature* 404, 187–190.

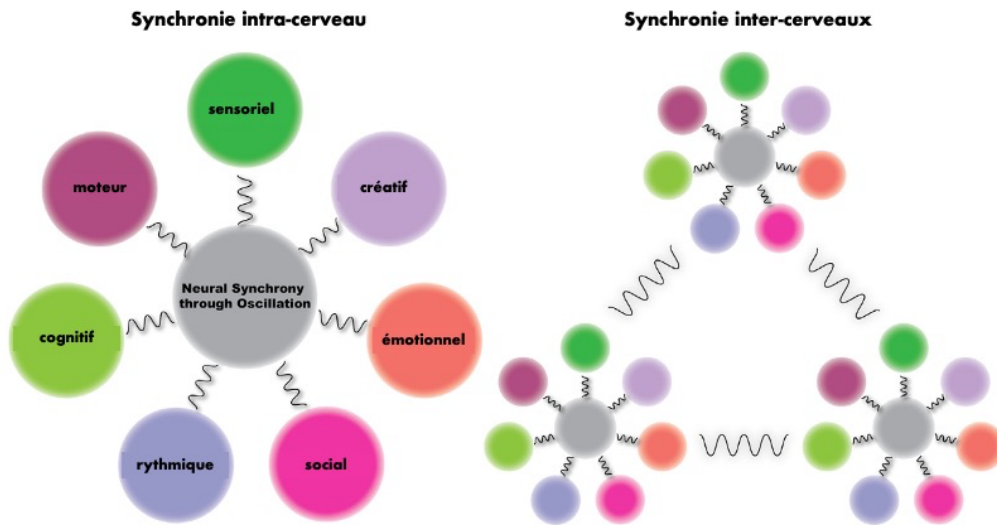


Figure 5 : L'hypothèse de la synchronie du cerveau engagé dans une activité de danse (d'après Basso et al., 2021). Les auteurs supposent que la danse améliore la synchronie neurale dans les régions du cerveau soutenant sept domaines neurocomportementaux : sensoriel, moteur, cognitif, social, émotionnel, rythmique et créatif. De plus, l'hypothèse stipule que lorsque nous dansons avec les autres, la dynamique cérébrale entre les individus devient synchronisée. C'est-à-dire que la danse améliore la synchronie intra- et inter-cerveau. Une dimension supplémentaire serait procurée par les systèmes cérébraux de la récompense qui, qui par le biais d'un accroissement de la synchronie neuronale, augmenteraient la coordination inter-personnelle.