Le don et la malédiction d'Apollon

Acquisition et perte d'habileté motrice chez les musiciens : Plasticité adaptative et maladaptative dans les systèmes sensori-moteurs des musiciens

Eckart ALTENMÜLLER

Prof. em. Dr. med. Dipl. mus. Eckart Altenmüller MD, MA,
Ancien directeur de l'Institut de Physiologie Musicale et de Médecine des Musiciens (IMMM)
Université de Musique, d'Art Dramatique et des Médias, Hanovre, Allemagne

DOI : https ://doi.org/10.17184/eac.9626

Résumé : Jouer de la musique à un niveau professionnel nécessite l'intégration d'informations sensorielles et motrices multimodales et le suivi de l'interprétation avec une grande précision temporo-spatiale. Ces compétences supérieures des musiciens dépendent d'une pratique prolongée et se reflètent dans les adaptations plastiques du cerveau, les altérations de la matière grise et blanche et de la connectivité des réseaux. La spécialisation a un revers : la perte de contrôle des mouvements habiles, la « crampe du musicien ». Les études de neuro-imagerie désignent comme cause un dysfonctionnement de la neuroplasticité, mais une surutilisation et des événements traumatisants peuvent déclencher ce trouble.

Mots-clés : neurophysiologie de la musique – perception musicale – neuroplasticité – métaplasticité – crampe du musicien

The gift and curse of Apollo. Acquisition and loss of motor skills in musicians: Adaptive and maladaptive plasticity in musicians' sensory-motor systems

Abstract: Performing music at a professional level requires the integration of multimodal sensory and motor information and monitoring of the performance with high temporo-spatial precision and reproducibility. These superior skills of musicians depend on prolonged practice and are mirrored in plastic adaptations of the brain including alterations in grey and white matter and network connectivity. There is a dark side to the increasing specialisation, namely the loss of control of skilled movements, a disorder referred to as "musicians' cramp". Neuroimaging studies point to dysfunctional neuroplasticity as its cause, however, underlying genetic susceptibility, overuse and traumatizing events may trigger the disorder.

Keywords: neurophysiology of music – music perception – neuroplasticity – metaplasticity – musician's cramp

1 Introduction

Apollon, en tant que tuteur et dieu protecteur de la musique et de l'art de guérir, semble correspondre parfaitement au sujet de cette contribution : faire de la musique comme moyen de modifier les réseaux neuronaux et la structure du cerveau, avec ses effets positifs en neuro-réhabilitation, pourrait être appelé « le don d'Apollon », alors que, d'un autre côté, faire trop de musique peut entraîner des problèmes de surmenage et une perte de dextérité manuelle chez les musiciens. Le trouble découlant d'une pratique excessive est appelé « malédiction d'Apollon ». Les deux conditions, sont des conséquences de la plasticité cérébrale, la capacité de notre système nerveux à s'adapter à des tâches exigeantes sous l'effet d'une forte excitation émotionnelle.

Les musiciens ayant une formation et une expérience approfondies constituent un excellent modèle pour l'étude de ce type de plasticité du cerveau humain. Les exigences imposées au système nerveux par l'exécution musicale sont très élevées et offrent au musicien une expérience multisensorielle et motrice d'une richesse unique. Comme le confirment les études de neuro-imagerie, jouer de la musique dépend d'un couplage étroit entre la perception et l'action, médié par des zones d'intégration sensorielle, motrice et multimodale réparties dans l'ensemble du cerveau (Altenmüller/Furuya 2016). Un pianiste, par exemple, doit faire appel à tout un ensemble de compétences complexes, notamment traduire l'analyse visuelle de la notation musicale en actions motrices, coordonner les informations multisensorielles avec l'activité motrice bimanuelle, développer une motricité fine des mains associée à une précision métrique, et contrôler le retour d'information auditive pour affiner l'exécution au fur et à mesure qu'elle progresse.

Dans ce qui suit, je résume la recherche sur les effets de la formation musicale sur les fonctions cérébrales, la connectivité cérébrale et la structure cérébrale. J'aborde non seulement les adaptations bénéfiques liées à la pratique de la musique, mais je montre également le côté sombre, le phénomène de « désexpertise », en passant en revue les études qui prouvent que la pratique intensive de la musique peut induire des changements dysfonctionnels qui s'accompagnent d'une dégradation du comportement moteur habile, également appelée « dystonie du musicien ». Cette affection, souvent très invalidante, touche principalement les musiciens classiques de sexe masculin ayant des antécédents de travail compulsif, de troubles anxieux ou de douleurs chroniques.

2 La pratique de la musique comme moteur de la plasticité cérébrale

Jouer de la musique à un niveau professionnel est l'une des expériences humaines les plus exigeantes et les plus fascinantes. Chanter et jouer un instrument implique l'exécution précise de mouvements très rapides et, dans de nombreux cas, extrêmement complexes, qui doivent être structurés et coordonnés avec un feedback auditif, somatosensoriel et visuel continu. En outre, cela nécessite la récupération d'informations musicales, motrices et multisensorielles dans la mémoire à court terme et à long terme et repose sur la planification continue d'une exécution en cours dans la mémoire de travail. Les conséquences des actions motrices doivent être anticipées, surveillées et ajustées presque en temps réel (Brown *et alii* 2015). En même temps, la musique doit

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

être expressive, ce qui exige que la performance soit enrichie d'un ensemble complexe de gestes émotionnels innés et acculturés.

La pratique est nécessaire pour développer toutes ces compétences et exécuter ces tâches complexes. Ericsson et ses collègues (1993) ont entrepris l'une des études les plus influentes sur la pratique, avec des étudiants de l'Académie de musique de Berlin. Ils ont pris en compte non seulement le temps investi dans la pratique, mais aussi la qualité de la pratique. Par qualité de de la pratique, on entend ici la variabilité de l'exercice, le degré de motivation et la concentration. Ils ont proposé le concept de « pratique délibérée » comme condition préalable pour atteindre de l'excellence. La pratique délibérée se définit selon Ericsson comme une pratique orientée vers un objectif, structurée et laborieuse. Cette pratique demande une grande concentration et l'utilisation de toutes les ressources mentales et physiques disponibles. Ericsson et ses collègues soutiennes qu'une distinction majeure entre les musiciens professionnels et amateurs, et généralement entre les apprenants qui réussissent le mieux et ceux qui réussissent moins bien, est la quantité de pratique délibérée entreprise au cours des nombreuses années nécessaires pour développer des compétences instrumentales à un niveau élevé (Ericsson/Lehmann 1996). Les musiciens extraordinairement doués déploient donc beaucoup plus d'efforts et de concentration pendant leur pratique que les musiciens moins doués, et sont plus susceptibles de planifier, d'imaginer, de surveiller et de contrôler leur jeu en concentrant leur attention sur ce qu'ils pratiquent et sur la manière dont ils peuvent l'améliorer. En outre, ils peuvent être désireux de construire un réseau de pairs qui les soutiennent, en impliquant fréquemment leur famille et leurs amis.

Le concept de pratique délibérée a été remis en question par Macnamara et Maitra (2019). Ils soulignent qu'Ericsson *et alii* (1993) ont opérationnalisé la pratique délibérée en tant que pratique conçue par l'enseignant ; cependant, dans une étude de réplication de Macnamara et Maitra, l'ampleur de l'effet contribuant à l'expertise était – bien que substantielle – considérablement plus faible que celle de l'étude originale. La pratique conçue par l'enseignant a été perçue comme moins pertinente pour améliorer les performances au violon que la pratique seule. En outre, ces dernières années, il est apparu clairement que non seulement la quantité de pratique, mais aussi le moment de la vie où commence une pratique intensive orientée vers un objectif sont des variables importantes.

Dans le domaine auditif, par exemple, il existe des périodes critiques – des « fenêtres d'opportunité » – pour l'acquisition de ce que l'on appelle l'oreille absolue. L'oreille absolue désigne la faculté de reconnaître (et savoir nommer) à l'écoute d'un son, une ou plusieurs notes dans un accord sans avoir eu besoin d'entendre au préalable une note identifiée servant de référence. Elle est médiée par la mémoire auditive à long terme et est fortement liée à une expérience musicale précoce intense, généralement avant l'âge de sept ans (Baharloo *et alii* 1998). Cependant, la prédisposition génétique peut jouer un rôle puisque l'oreille absolue est plus fréquente dans certaines populations d'Asie de l'Est et qu'elle peut être héréditaire (Baharloo *et alii* 2000 ; Gregersen *et alii* 2001). Dans le domaine sensori-moteur, une pratique précoce avant l'âge de 7 ans conduit à des programmes moteurs optimisés et plus stables (Furuya

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

et alii 2014) et à des réseaux neuronaux plus petits mais plus efficaces, par rapport à une pratique débutant plus tard dans la vie (Vaquero *et alii* 2016). Cela signifie que pour des compétences sensori-motrices spécifiques telles que les mouvements rapides et indépendants des doigts, il existe des périodes sensibles au cours du développement et de la maturation du système nerveux central, comparables à celles des compétences auditives et somatosensorielles (Ragert *et alii* 2003). Pour rendre le tableau encore plus complexe, de nouveaux résultats de tests de jumeaux suggèrent qu'en moyenne, 50 % des différences individuelles dans l'expertise musicale sont dues à des influences génétiques, alors que les influences environnementales et résiduelles partagées n'expliquent chacune qu'environ 25 %. L'héritabilité relative des aptitudes musicales augmente avec le nombre d'heures de pratique. Ces résultats démontrent que la prédisposition génétique reste importante pour l'acquisition de l'expertise musicale, même après une pratique prolongée, et soulignent que les comportements de pratique et d'auto-optimisation sont soumis à de fortes influences génétiques (Mosing *et alii* 2024). Néanmoins, certains caractères acquis peuvent être hérités mais il ne s'agit pas de l'hérédité génétique mais épigénétique (Sotiropoulos/Anagnostouli 2021)

La question de l'opposition entre l'innée et l'acquis, ou entre la prédisposition génétique et les influences environnementales, et la formation aux compétences musicales est complexe, car le succès de la formation est lui-même soumis à la variabilité génétique. L'observation générale suggère que les résultats ne seront pas identiques pour tous les individus recevant la même durée et nombre d'années de formation. Les preuves de la contribution des différences individuelles préexistantes proviennent d'une vaste étude suédoise sur les jumeaux, qui montre que la propension à pratiquer est partiellement héréditaire (Mosing *et alii* 2014). Dans une série d'études, Schellenberg et ses collègues ont examiné la contribution des variables cognitives et de personnalité à la formation musicale, montrant que ceux qui pratiquent la musique obtiennent de meilleurs résultats dans les tâches cognitives, ont des parents plus instruits et se décrivent comme plus « ouverts à l'expérience » sur les échelles de personnalité (Corrigall *et alii* 2013). Les résultats commencent également à s'accumuler dans le domaine de la performance musicale indiquant que les résultats de l'apprentissage peuvent être prédits en partie sur la base de caractéristiques cérébrales structurelles ou fonctionnelles préexistantes (Herholz *et alii* 2016). Un exemple convaincant de prédisposition génétique dysfonctionnelle est l'incapacité d'acquérir des compétences auditives dans le cas de l'amusie congénitale, une maladie héréditaire caractérisée par une perception de la hauteur absente ou très déficiente (Gingras *et alii* 2015). Dans le domaine sensori-moteur, la dystonie du musicien, c'est-à-dire la perte du contrôle moteur dans les mouvements habiles effectués en jouant d'un instrument, a une forte origine génétique chez environ un tiers des musiciens affectés (Schmidt *et alii* 2009).

D'autre part, la formation est manifestement nécessaire pour acquérir une expertise musicale, un grand nombre de chercheurs signalant que la durée de la pratique musicale est fortement corrélée à la performance dans une série de tâches musicales ainsi qu'au fonctionnement et à la structure du cerveau (Amunts *et alii* 1997 ; Bengtsson *et alii* 2005 ; Bermudez *et alii* 2008 ; Chen *et alii* 2008 ; Oechslin *et alii* 2010). Les prédispositions et l'expérience contribuent à l'expertise musicale et l'équilibre relatif entre les deux facteurs peut différer dans des aspects spécifiques des nombreuses sous-

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

compétences musicales (par exemple ouïe, mémoire, imagination, capacités sensori-motrices, compétences émotionnelles). En outre, il semble qu'il existe des périodes sensibles précoces au cours desquelles la stimulation musicale ou l'entraînement des sous-compétences doit avoir lieu afin d'établir un terrain fertile pour le développement d'une expertise extraordinaire plus tard dans la vie. La métaphore de l'échafaudage (Steele *et alii* 2013) en est la meilleure illustration. Un début de formation précoce permet de développer l'« échafaudage » nécessaire à la construction d'un niveau d'expertise semblable à un gratte-ciel plus tard dans la vie, tandis qu'un début de formation tardif ne permet d'obtenir que des résultats modérés, même après une formation longue et intense. Bien entendu, ces échafaudages peuvent différer d'un domaine à l'autre. Par exemple, un virtuose exceptionnel tel que le légendaire pianiste Lang Lang connu pour sa dextérité époustouflante peut avoir besoin à la fois de traits héréditaires très pertinents et d'une formation sensori-motrice précoce intense. D'autres musiciens tel que la chanteuse Édith Piaf connue pour son expressivité émotionnelle mais quelque peu dépourvue de technique, peuvent avoir commencé les exercices techniques tardivement mais bénéficier de conditions génétiques et biographiques leur permettant d'acquérir une profondeur émotionnelle, un trait de caractère que nous ressentons et apprécions malgré la difficulté de l'opérationnaliser en vue d'une étude précise.

La plasticité cérébrale désigne la capacité générale de notre système nerveux central à s'adapter tout au long de la vie à des conditions environnementales changeantes, à la biomécanique du corps et à de nouvelles tâches. La plasticité cérébrale est le plus souvent observée pour des tâches complexes à forte pertinence comportementale et pour celles qui activent des circuits impliqués dans l'émotion la motivation et la récompense. Les activités continues des musiciens accomplis sont idéales pour fournir les conditions préalables à la plasticité cérébrale (pour une revue, voir Schlaug 2015). Dans l'expertise musicale, les processus s'accompagnent de changements dans la fonction des réseaux neuronaux du cerveau à la suite d'un renforcement des connexions synaptiques, et de modifications de sa structure.

3 Régions du cerveau impliquées dans l'exécution de la musique : un aperçu rapide

Jouer d'un instrument de musique ou chanter à un niveau professionnel exige des compétences auditives, sensori-motrices et émotionnelles-communicatives très raffinées, acquises au cours de nombreuses années d'entraînement intensif, et qui doivent être stockées et entretenues par une pratique régulière. Le retour auditif est nécessaire pour améliorer et perfectionner la performance et l'acuité des zones cérébrales liées à l'émotion est requise pour rendre une performance vivante et touchante. La pratique musicale basée sur la performance repose donc principalement sur une capacité d'intégration auditive-motrice-émotionnelle très développée qui se traduit d'une part par une connectivité neuronale accrue et d'autre part par des adaptations fonctionnelles et structurelles des zones cérébrales qui soutiennent ces activités. Dans ce qui suit, nous donnons un aperçu rapide des nombreuses régions cérébrales impliquées dans la création musicale (pour une revue, voir Brown *et alii* 2015).

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

Les figures 1 et 2 donnent un aperçu de la neurophysiologie de la perception musicale et de la pratique musicale. Dans la figure 1, c'est surtout la structure globale du cerveau qui est représentée, avec les fonctions essentielles correspondantes. La figure 2 présente les différentes zones du cortex cérébral gauche et leurs fonctions principales respectives.

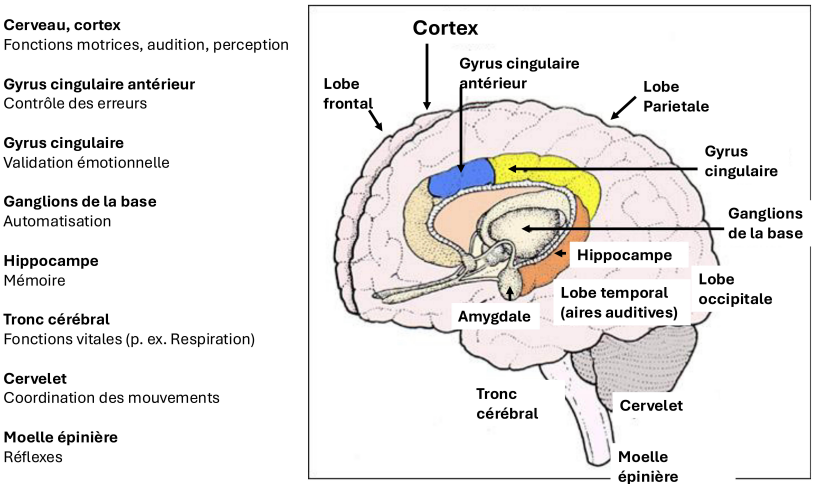


FIG. 1 : Structure de l'ensemble du cerveau et fonctions importantes pour la pratique musicale.

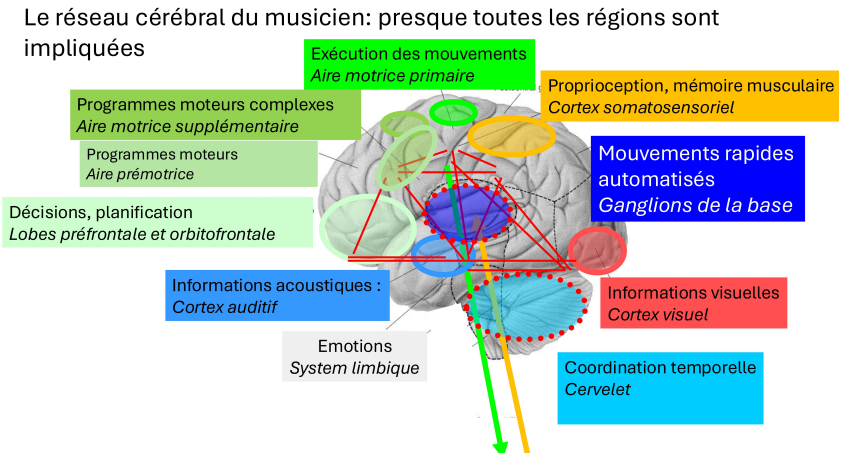


FIG. 2 : Les régions du cerveau et leurs fonctions respectives dans la pratique de la musique. Il est important de noter que cette activité repose sur un échange dynamique d'influx nerveux dans un réseaux neuronaux à adaptation rapide. Les lignes rouges symbolisent les connexions neuronales entre les centres.

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

La perception de la musique fait intervenir les *aires auditives primaires et secondaires* (A1, A2) et les *aires d'association auditive* (AA) dans les deux lobes temporaux. L'aire auditive primaire, localisée dans la partie supérieure du lobe temporal dans le gyrus de Heschl, reçoit sa principale entrée de l'oreille interne *via* la voie auditive ascendante. Elle est principalement impliquée dans le traitement auditif de base, comme la perception de la hauteur et de l'intensité sonore, la perception des structures temporelles et la décomposition spectrale. Le cortex auditif primaire gauche est spécialisé dans l'analyse rapide des structures temporelles, telles que les différences de temps d'apparition de la voix lors de l'articulation de « da » ou « ta ». Le droit, quant à lui, s'occupe principalement de la décomposition spectrale des sons. Les aires auditives secondaires entourent l'aire primaire en formant une ceinture. Des caractéristiques auditives plus complexes, telles que le timbre, sont traitées dans les aires auditives secondaires (Koelsch 2011). Enfin, dans les aires d'association auditive, la perception de la forme auditive a lieu. Les formes auditives peuvent être comprises, par exemple, comme les mélodies et les mots. Chez les droitiers, et chez environ 95 % des gauchers, l'aire de Wernicke située dans la partie postérieure gauche du lobe temporal supérieur, est spécialisée dans le décodage du langage (Kraus *et alii* 1998).

Contrairement au traitement auditif précoce de structures acoustiques simples, l'écoute de la musique est une tâche beaucoup plus complexe. La musique est vécue non seulement comme une structure acoustique dans le temps mais aussi comme des modèles, des associations, des émotions, des attentes, etc. Ces expériences reposent sur un ensemble complexe d'opérations perceptives, cognitives et émotionnelles. Intégrées dans le temps et souvent liées à des souvenirs biographiques, elles nous permettent de ressentir des émotions fortes, traitées dans des structures du système limbique telles que l'aire tegmentale ventrale du mésencéphale ou le noyau accumbens dans le cerveau antérieur basal (Salimpoor *et alii* 2013). Les souvenirs et les émotions sociales évoqués pendant l'écoute et la pratique de la musique impliquent l'*hippocampe*, situé dans le lobe temporal, et le cortex préfrontal dorsolatéral, principalement dans l'hémisphère droit.

Faire de la musique nécessite des mouvements volontaires et habiles qui impliquent quatre régions corticales dans les deux hémisphères : l'*aire motrice primaire* (AMP), située dans le *gyrus précentral*, directement devant le sillon central ; l'*aire motrice supplémentaire* (AMS), située en avant de l'aire motrice primaire dans le lobe frontal du cortex ; le *cortex cingulaire* (CC), situé sous l'AMS et au-dessus du corps calleux, sur la face interne (médiane) de l'hémisphère ; et l'*aire prémotrice* (APM), située à côté de la face latérale de l'aire motrice primaire (voir figures 1 et 2).

La AMS, la APM et le CC peuvent être décrits comme des *aires motrices secondaires*, car elles sont utilisées pour traiter les schémas de mouvement plutôt que les mouvements simples. Outre les régions corticales, le système moteur comprend les structures sous-corticales des ganglions de la base et du cervelet (voir fig. 1). Un retour kinesthésique régulier est également nécessaire pour contrôler toute action motrice guidée et provient de l'*aire somatosensorielle primaire* (S1) située derrière le sillon central dans le lobe pariétal. Ce lobe est impliqué dans de nombreux aspects du traitement du mouvement et constitue une zone où convergent les informations provenant de

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

plusieurs régions sensorielles. Dans la zone pariétale postérieure, les coordonnées du corps dans l'espace sont contrôlées et calculées et les informations visuelles sont transférées dans ces coordonnées. En ce qui concerne les musiciens, cette zone est fortement activée lors de tâches impliquant une intégration multisensorielle, par exemple lors de la lecture à vue, de l'interprétation de morceaux de musique complexes (Haslinger *et alii* 2005) et de la transformation d'informations sur la hauteur de la note musicale en coordonnées de mouvement (Brown *et alii* 2013) et de la partition musicale en actions motrices correspondantes (Stewart *et alii* 2003).

4 Les effets de la formation musicale sur la structure du cerveau

Depuis l'époque de la phrénologie, les neuroscientifiques ont tenté d'établir un lien entre des compétences extraordinaires et des changements dans l'anatomie du cerveau. Les techniques modernes d'imagerie cérébrale telles que l'imagerie par résonance magnétique (IRM) à haute résolution, la morphométrie basée sur le voxel (VBM) et la morphométrie basée sur le tenseur (TBM), permettent de déterminer avec précision le volume de matière grise et de matière blanche dans des régions cérébrales prédéfinies. Les différences de volume et de direction des fibres peuvent être évaluées grâce à l'imagerie du tenseur de diffusion (ITD). Celle-ci fournit des informations sur les microstructures de la matière blanche en mesurant les propriétés de diffusion des molécules d'eau qui se déplacent préférentiellement le long des couches de myéline des axones. Le degré de diffusivité est quantifié en tant qu'anisotropie fractionnelle (AF), une mesure qui permet d'évaluer l'orientation et la direction des axones et leur degré de myélinisation (Bandettini 2009).

Dans le domaine auditif, les adaptations fonctionnelles, telles qu'une sensibilité accrue aux sons, s'accompagnent de changements anatomiques dans les cortex auditifs primaires ou secondaires du gyrus temporal supérieur et du plan temporal (Bermudez *et alii* 2008 ; Gaser/Schlaug 2003 ; Schneider *et alii* 2005 ; Zatorre *et alii* 2007). Une étude réalisée par Schneider et ses collègues (2002) chez des musiciens professionnels, des amateurs et des non-musiciens est particulièrement significative. Ces auteurs ont non seulement constaté une augmentation du volume du cortex auditif primaire (gyrus de Heschl) lié à l'augmentation du temps de pratique cumulé chez les musiciens professionnels, mais ils ont également démontré que cet élargissement s'accompagnait de représentations neuronales plus prononcées pour les sons purs dans la même région, comme le reflète la taille du dipôle des champs neuromagnétiques évoqués. Des tests comportementaux effectués sur les trois mêmes groupes de sujets ont révélé que le volume du gyrus de Heschl était positivement lié à l'amélioration de la mémoire de travail auditive et de la perception auditive des formes, telles qu'elles ont été mises en œuvre dans le cadre d'un test d'aptitude musicale. Une étude longitudinale menée auprès d'enfants a montré que ces changements comportementaux, fonctionnels et anatomiques étaient liés à la formation musicale (Hyde *et alii* 2009). Quinze enfants de six ans ont suivi une formation au piano pendant 15 mois et ont montré non seulement une amélioration de la perception auditive, mais aussi une augmentation de la matière grise du cortex auditif primaire droit par rapport à 16 enfants du même âge qui n'ont pas pris de cours de piano. Six mois d'entraînement au piano chez des personnes âgées en moyenne de 70 ans âgées ont donné des résultats similaires, une

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

augmentation de la densité de la matière grise dans le cortex d'association auditive et une amélioration de la perception de la parole dans le bruit (Worschech *et alii* 2022).

Dans le domaine sensori-moteur, une pratique musicale intensive pendant l'enfance et l'adolescence pourrait avoir un effet important sur la maturation et le développement des structures cérébrales impliquées. Les pianistes ont été un groupe privilégié pour étudier les changements structurels du cerveau en raison de la forte demande de dextérité bimanuelle et de la possibilité d'évaluer des comportements tels que la vitesse et la régularité des mouvements des doigts grâce à la technologie MIDI (Bangert/Altenmüller 2003 ; Bangert *et alii* 2006). Dans la première étude portant sur les différences structurelles entre les musiciens et les non-musiciens, Schlaug et ses collaborateurs (Schlaug *et alii* 1995) ont montré que les musiciens professionnels (pianistes et instrumentistes à cordes) avaient une section médiane du corps calleux plus large que celle d'un groupe témoin de non-musiciens. Ce résultat a été attribué à une augmentation de la myélinisation dans les fibres croisées des zones de la main des deux hémisphères, liée aux exigences élevées de la coordination bimanuelle. Différents groupes de recherche utilisant un éventail d'approches méthodologiques ont reproduit ce résultat (Oztürk *et alii* 2002 ; Steele *et alii* 2013 ; Gärtner *et alii* 2014). Une relation de cause à effet entre l'apprentissage du piano et l'élargissement du corps calleux a été établie dans l'étude longitudinale susmentionnée de Hyde *et alii* (2009). D'autres réseaux de fibres nerveuses ont également été examinés chez les musiciens : dans une étude d'imagerie par tenseur de diffusion (DTI) menée auprès de pianistes, Bengtsson et ses collègues (2005) ont constaté que le nombre et l'épaisseur des fibres nerveuses dans certaines voies nerveuses étaient plus importants chez les musiciens et en corrélation avec la quantité estimée de pratique musicale pendant l'enfance. Ces structures comprenaient la branche postérieure de la capsule interne, une partie du tractus corticospinal descendant du cortex moteur à la moelle épinière, et des tracts de fibres reliant les lobes temporaux et frontaux. Bien que le nombre total d'heures de pratique durant l'enfance soit inférieur à celui de l'adolescence et de l'âge adulte, ces adaptations soutiennent l'idée que le système nerveux central présente de plus grandes capacités plastiques durant les premiers stades de développement et les périodes de maturation.

En ce qui concerne la taille du cortex moteur primaire, divers résultats ont été rapportés. Chez les pianistes, la profondeur du sillon central, souvent utilisée comme marqueur de la taille du cortex moteur primaire, était plus importante dans les deux hémisphères mais, par rapport aux non-musiciens, plus prononcée dans l'hémisphère droit, correspondant à la fonction de la main gauche non dominante (Amunts *et alii* 1997 ; Schlaug 2001). Il a été avancé que des années de pratique manuelle de la main gauche non dominante produisaient cet effet sur l'hémisphère droit. Pour la main droite et l'hémisphère gauche dominant, cet effet était censé être masqué, puisqu'ils subissent une forme d'entraînement à la motricité fine chez tous ceux qui écrivent et effectuent d'autres tâches sensori-motrices qualifiées avec cette main. Comme pour le corps calleux, il existe une corrélation positive entre la taille du cortex moteur primaire et le début de la formation musicale instrumentale. Une fois encore, une relation de cause à effet a été établie dans l'étude longitudinale susmentionnée menée auprès d'enfants novices en piano, avec une augmentation de la densité de la ma-

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

tière grise dans la zone de la main motrice droite associée à 15 mois d'apprentissage du piano (Hyde *et alii* 2009). Une étude portant sur des pianistes d'environ 40 ans (43,3 ± 3,8) a révélé des détails intéressants concernant l'effet d'une expertise continue sur la plasticité tout au long de la vie (Gärtner *et alii* 2014). Les pianistes qui continuaient à donner des concerts et à s'entraîner au moins trois heures par jour présentaient non seulement des zones motrices de la main plus grandes, mais aussi des zones du pied plus grandes dans les cortex sensori-moteurs des deux hémisphères que les pédagogues qui s'étaient spécialisés dans l'interprétation du piano, mais qui s'étaient entraînés moins de deux heures par jour au cours des dix dernières années. Ce résultat est lié au rôle important de la pédale dans le jeu du piano. La maîtrise de la pédale est une technique très raffinée qui nécessite un contrôle spatio-temporel de l'ordre du millimètre et de la milliseconde afin de moduler de manière adaptative la couleur, l'expressivité et le volume sonore de la musique.

Des différences cérébrales structurelles ont été signalées chez les musiciens jouant de différents instruments (Bangert/Schlaug 2006). Le pliage en forme d'oméga du gyrus précentral, qui est associé à la représentation des mouvements de la main et des doigts, s'est avéré plus important dans l'hémisphère gauche chez les pianistes, mais plus important dans l'hémisphère droit chez les instrumentistes à cordes. Cette différence structurelle reflète probablement une adaptation aux exigences spécifiques des différents instruments de musique. De toute évidence, les mouvements rapides et spatiotemporels précis de la main gauche chez les instrumentistes à cordes constituent un stimulus plus fort pour les adaptations plastiques que les mouvements d'archet de la main droite, qui nécessitent un équilibre précis des doigts sur la pointe de l'archet et des mouvements précis du poignet et du bras. Gaser et Schlaug (2003) ont comparé des pianistes professionnels, des musiciens amateurs et des non-musiciens et ont constaté une augmentation du volume de matière grise (MG) chez les musiciens professionnels, non seulement dans les zones motrices, somatosensorielles et prémotrices primaires, mais aussi dans les zones d'intégration pariétale multisensorielle et dans les régions cérébelleuses du cerveau.

Il est maintenant bien établi qu'avec l'augmentation de l'expertise, on peut observer non seulement un élargissement mais aussi une réduction de la structure neuronale. Cela a été établi pour la première fois dans une étude sur les pianistes ciblant le putamen moyen dans les ganglions de la base, une région du cerveau impliquée dans l'automatisation des programmes moteurs. Granert et ses collègues (2011) ont mesuré le niveau d'habileté au piano par la précision temporelle dans une tâche de jeu de gamme. Ces auteurs ont constaté que plus le niveau de jeu au piano était élevé, plus le volume de matière grise dans le putamen droit était réduit. Cette réduction a été attribuée à un processus d'optimisation des réseaux neuronaux au sein du putamen, conduisant à des connexions dendritiques et axonales moins nombreuses, mais plus efficaces et plus stables dans cette zone de la boucle motrice des ganglions de la base.

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

5 La désexpertise : La dystonie du musicien, un syndrome de plasticité inadaptée

La plasticité cérébrale n'est pas toujours bénéfique. Le surentraînement, la peur de l'échec, la douleur chronique et d'autres facteurs de stress peuvent déclencher une détérioration du contrôle moteur et initier un processus de dégradation des compétences. Nous proposons d'appeler cette perte de compétences induite par la plasticité « désexpertise ». Environ 2 % des musiciens professionnels souffrent d'une perte de contrôle volontaire de leurs compétences sensori-motrices complexes, affinées et longuement entraînées. Cette affection est généralement appelée dystonie focale, crampe du violoniste ou crampe du pianiste. Dans de nombreux cas, la dystonie focale est si invalidante qu'elle met fin prématurément à la carrière professionnelle de l'artiste (Altenmüller *et alii* 2015). Les différents symptômes qui peuvent marquer le début du trouble comprennent une perte subtile de contrôle dans les passages rapides, un enroulement des doigts (*cf.* figure 3), un manque de précision dans les doigtés en fourche chez les bois, une irrégularité des trilles, des doigts collés sur les touches, une flexion involontaire du pouce d'archet dans les cordes et une altération du contrôle de l'embouchure chez les bois et les cuivres dans certains registres. À ce stade, la plupart des musiciens pensent que la diminution de la précision de leurs mouvements est due à un problème technique. En conséquence, ils intensifient leurs efforts, mais cela ne fait souvent qu'exacerber le problème.



Fig. 3 : Exemples de postures dystoniques typiques chez un pianiste, un violoniste, un tromboniste et un flûtiste. Illustration reproduite avec l'aimable autorisation des éditions Science and Medicine.

La dystonie du musicien (DM) a été décrite pour presque tous les instruments, y compris le clavier, les cordes, les instruments à cordes pincées, les bois, les cuivres, les percussions et les instruments folkloriques tels que la cornemuse et l'accordéon. Dans une étude sur l'épidémiologie de 364 musiciens professionnels allemands souffrant de DM, les claviéristes étaient les plus nombreux avec 27,1 % (pourcentage dans la population de musiciens sains 29 %, Altenmüller *et alii* 2012), suivis par les bois (21,7 %, contre 15 % pour les musiciens sains) et les cuivres (20,9 %, contre 10 % pour les musiciens sains). Si l'on subdivise ces groupes instrumentaux en instruments

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

individuels, le piano représente 22 % du total, la guitare 15,2 %, la flûte 9,7 % et le violon 7,6 % (Doll-Lee *et alii* 2024).

La rareté relative de certains instruments dans ces études (même en tenant compte du nombre relatif dans la population de musiciens en bonne santé) comme la contrebasse, la harpe et le violoncelle, et la surreprésentation du piano, de la guitare et de la flûte suggèrent que les exigences physiques spécifiques de l'instrument constituent des facteurs de risque (Altenmüller *et alii* 2012). Par exemple, le placement rapide, fin et simultané des doigts à la guitare, au piano, au violon et à la flûte peut être plus susceptible de déclencher le développement d'une dystonie que la flexion forcée des doigts à un tempo plus lent, comme l'exigent la contrebasse et le violoncelle. Il semblerait que la répartition des mains affectées dans la dystonie du musicien ne soit pas aléatoire. Chez les pianistes et les guitaristes, la main droite est plus fréquemment touchée, tandis que chez les violonistes, c'est la main gauche qui l'est. Ces tendances correspondent à des différences dans les exigences techniques imposées par chaque instrument. Le répertoire virtuose du piano exige davantage de la main droite que de la main gauche, car la main droite doit généralement jouer des trilles, des arpèges et des ornements plus rapides. En outre, elle porte souvent la ligne mélodique aiguë avec les 3^{e}, 4^{e} et 5^{e} doigts (Lehmann/Ericsson 1996). Au violon, les exigences techniques de la main gauche sont plus prononcées, nécessitant une précision temporelle et spatiale de l'ordre de la milliseconde et du millimètre pour un jeu de niveau professionnel. Chez les joueurs de bois, les deux mains sont également susceptibles d'être affectées. Les flûtistes font exception, car la main gauche est plus souvent problématique, l'index gauche devant supporter le poids de l'instrument et appuyer sur les touches, et le pouce, l'annulaire et l'auriculaire gauches étant extrêmement actifs par rapport à ceux de la main droite (Baur *et alii* 2011).

L'interaction des facteurs prédisposants et déclenchants dans la dystonie du musicien est devenue un sujet de recherche intense (Jabusch/Altenmüller 2004 ; Ioannou/Altenmüller 2015 ; Ioannou *et alii* 2016 ; Doll Lee *et alii* 2024). Le sexe masculin et la prédisposition génétique au dysfonctionnement des réseaux neuronaux impliqués dans les représentations et les voies sensori-motrices jouent un rôle en tant que facteurs prédisposants (Schmidt *et alii* 2009). En outre, des traits psychologiques tels qu'une anxiété élevée et des troubles obsessionnels compulsifs (TOC) ont été documentés (Enders *et alii* 2011). Les TOC et l'anxiété peuvent à leur tour conduire à des comportements déclenchant la dystonie, tels que l'utilisation excessive des muscles et l'entraînement exagéré et répétitif. Les facteurs déclenchants suivants ont été identifiés : exigences motrices élevées, en particulier à la fin de l'adolescence (Passarotto *et alii* 2023) ; activités extra-instrumentales, telles que l'écriture et la dactylographie (Baur *et alii* 2011) ; début tardif de l'entraînement (Schmidt *et alii* 2013) ; la pratique de la musique classique qui exige un contrôle temporo-spatial précis ; l'augmentation de la tension psychologique et musculaire générale ; et la déstabilisation des programmes sensori-moteurs surappris en raison de changements techniques imposés ou de troubles sensoriels consécutifs à des lésions des nerfs ou des tissus mous (pour une revue, voir Altenmüller *et alii* 2015). L'interaction des facteurs prédisposants et déclenchants dans le développement de la dystonie du musicien est décrite dans la figure 4. Selon notre modèle, l'émergence de la dystonie du musicien est un processus

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

graduel, qui commence par des tensions réversibles et des mouvements dysfonctionnels appelés « stéréotypes dynamiques », qui sont ensuite progressivement consolidés dans les mémoires sensori-motrices et finalement automatisés. Ce n'est qu'à ce stade que l'on parle de dystonie du musicien, définie comme une incoordination musculaire persistante et difficile à guérir.

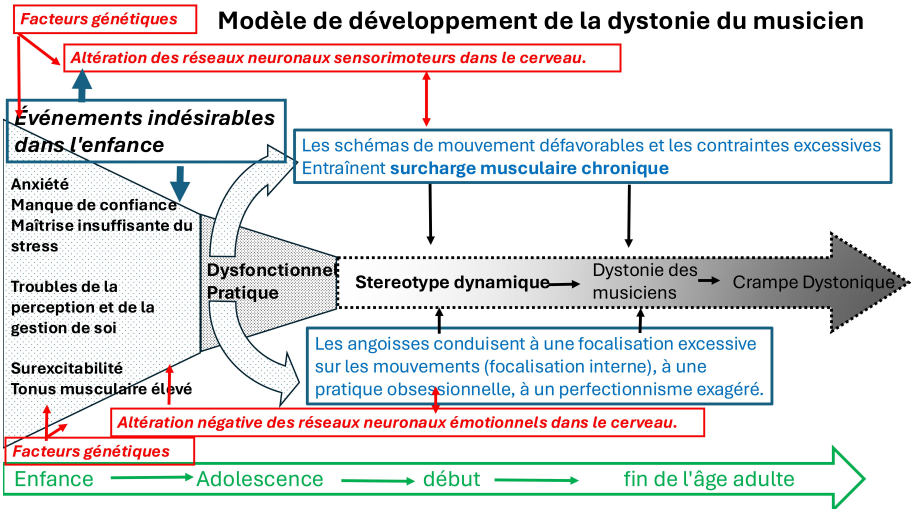


Fig. 4 : Modèle heuristique illustrant l'interaction proposée entre les facteurs de déclenchement sensori-moteurs et psychologiques et leur contribution aux différentes perturbations motrices au cours de la vie.

En ce qui concerne les facteurs prédisposants, les données démographiques montrent une prépondérance des musiciens masculins, avec un rapport hommes/femmes d'environ 4 :1. Par rapport à la répartition des sexes chez les musiciens en bonne santé, analysée en fonction des groupes d'instruments, les hommes étaient plus susceptibles de souffrir de la crampe du musicien que les femmes pour les instruments à clavier, à cordes, à vent et à cordes pincées. Les cuivres étaient le seul groupe instrumental où les symptômes n'étaient pas liés au sexe (Lim/Altenmüller 2003 ; Doll-Lee *et alii* 2024).

Les facteurs héréditaires jouent un rôle important, puisque des antécédents familiaux positifs de dystonie chez des parents du premier degré peuvent être trouvés chez 36 % des musiciens affectés (Schmidt *et alii* 2009). Des troubles anxieux et des TOC prémorbides sont observés chez jusqu'à 40 % de nos plus que mille patients (Ioannou/Altenmüller 2014 ; Ioannou *et alii* 2016 ; Worlitzsch *et alii* 2025). L'âge moyen d'apparition des symptômes dystoniques est de 35 ans (Lee *et alii* 2016), mais les musiciens présentant des niveaux élevés d'anxiété et de stress développent une dystonie en moyenne dix ans plus tôt (Ioannou *et alii* 2016). En outre, il existe une grande variabilité : les patients les plus jeunes développant une dystonie à l'âge de 18 ans environ et les plus âgés dans la soixantaine (Altenmüller 2003).

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

Le début tardif de la pratique instrumentale est un autre facteur déclenchant important. Les musiciens atteints de dystonie commencent leur formation à un âge moyen d'environ dix ans, alors que l'âge moyen de début de formation pour les musiciens en bonne santé est de sept ans (Schmidt *et alii* 2013). Cela souligne le rôle important de l'optimisation précoce des programmes sensori-moteurs pour permettre l'établissement d'un échafaudage stable en vue d'améliorations ultérieures tout au long de la vie. Le terme métaplasticité, qui fait référence aux périodes sensibles de la vie au cours desquelles les stratégies d'apprentissage générales dans des domaines spécifiques sont le mieux acquises, décrit ce phénomène (pour une revue, voir Altenmüller/Furuya 2016). La métaplasticité peut également expliquer le fait qu'une modification de la technique de jeu à un âge plus avancé, par exemple lors d'un changement de professeur pendant la transition entre l'école et l'université, peut déstabiliser les programmes moteurs et déclencher une dystonie.

La musique classique est le genre musical dans lequel évoluent la grande majorité des patients souffrant de dystonie focale. Contrairement à la musique pop ou au jazz, dont les morceaux sont souvent improvisés et qui offrent une grande liberté d'interprétation, c'est dans la musique classique que les contraintes musicales sont les plus sévères. Ce genre musical exige une précision temporelle maximale (de l'ordre de la milliseconde), qui est scrutée par le musicien et par le public tout au long de la représentation. Par conséquent, les représentations publiques de musique classique peuvent impliquer un niveau élevé de pression sociale ; dans ce cas, l'écart entre le succès et l'échec est minime.

Enfin, les traumatismes physiques et psychologiques sont fréquents dans l'histoire des musiciens souffrant de dystonie focale (Alpheis *et alii* 2022). En ce qui concerne les traumatismes physiques, nous savons que les troubles sensoriels et la douleur chronique peuvent induire des changements plastiques inadaptés dans les réseaux sensoriels et moteurs du cerveau, entraînant une dégradation du contrôle moteur. Les études neurales sur les conséquences des syndromes douloureux régionaux complexes (Henry *et alii* 2011) en sont la meilleure preuve. La recherche sur les traumatismes psychologiques déclenchant la dystonie du musicien n'en est qu'à ses débuts. Jabusch et Altenmüller (2004) ont proposé que le stress aigu et chronique puisse favoriser la formation d'une mémoire motrice dysfonctionnelle *via* l'activation bêta-adrénergique, la libération d'hormones de stress, l'augmentation du tonus musculaire et l'apprentissage associatif. Cette hypothèse a été élaborée récemment (Alpheis *et alii* 2023).

En résumé, l'association entre les facteurs déclencheurs mentionnés ci-dessus et le développement d'une dystonie focale spécifique à une tâche suggère fortement une forte contribution environnementale à la pathogenèse de la dystonie du musicien. Toutefois, l'observation selon laquelle la majorité des artistes interprètes ne développent heureusement pas de dystonie du musicien souligne le rôle important des prédispositions génétiques sous-jacentes.

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

6 La plasticité cérébrale en tant que condition préalable et résultat de la performance experte chez les musiciens

Dans les paragraphes précédents il a été décrit que les activités musicales, telles que l'apprentissage d'un instrument et la représentation en public, induisent une plasticité cérébrale. Ces adaptations nerveuses centrales sont dans la plupart des cas bénéfiques mais dans certaines circonstances elles peuvent être préjudiciables, comme l'illustre la dystonie du musicien. L'âge au début de la pratique, la quantité et la qualité de la pratique, la prédisposition génétique et les conditions qui l'accompagnent telles que les facteurs de stress ou la surutilisation musculaire, déterminent la qualité et la nature (adaptative ou inadaptée) de ces changements cérébraux. De plus, les « périodes sensibles » du cerveau, où les réseaux neuronaux sont le mieux formé, semblent non seulement dépendre de facteurs héréditaires, mais aussi varier dans différents domaines sensoriels, moteurs et cognitifs. Je propose donc le concept de métaplasticité, conceptualisé ci-dessus à l'aide d'une métaphore d'échafaudage : une formation musicale précoce stabilise le système sensori-moteur et a des effets neuroprotecteurs en ce qui concerne le développement de la dystonie focale (voir figure 5). Ces effets se maintiennent tout au long de la vie : les musiciens qui commencent tôt ne développent pas seulement des compétences auditives et sensori-motrices supérieures, ils présentent également un déclin moins important des fonctions sensori-motrices et cognitives induit par l'âge (Krampe/Ericsson 1996 ; Meinz 2000). Ainsi, une formation musicale intense pendant l'enfance peut entraîner des changements tout au long de la vie dans la structure et les fonctions des systèmes auditif, sensori-moteur et émotionnel. Non seulement ces changements améliorent l'acquisition des compétences musicales et protègent contre les troubles déclenchés par une formation intensive, mais ils servent également d'ingrédients pour mieux façonner le développement neuronal tout au long de la vie.

Je voudrais conclure le chapitre par une remarque générale. Comme j'ai souligné plus haut, les processus neurophysiologiques complexes impliqués dans la formation musicale et la performance experte ne se limitent pas aux circuits cérébraux sensori-moteurs mais impliquent également la mémoire, l'imagination, la créativité et – plus important encore – les compétences de communication émotionnelle. Les virtuoses les plus brillants n'émouvront pas leurs auditeurs si l'imagination, la couleur, la fantaisie et l'émotion ne font pas partie de leur expression artistique. Souvent, ces qualités ne s'acquièrent pas uniquement dans un studio de pratique mais dépendent et peuvent être liées à l'expérience de la vie quotidienne, aux relations humaines, à un environnement artistique riche et à la profondeur émotionnelle. Ces facteurs qui influencent profondément la qualité esthétique de la performance musicale peuvent faire l'objet d'une recherche d'expertise, mais ils sont actuellement inaccessibles à la méthodologie neuroscientifique. Les étapes importantes à cet égard incluront le développement de technologies d'imagerie plus fines et l'intégration des résultats de la morphologie du cerveau, du métabolisme des cellules nerveuses, des mesures de connectivité et des activités des neurotransmetteurs au niveau individuel (Amunts/Zilles 2015). Avec des paradigmes expérimentaux comprenant des mesures comportementales significatives, ces recherches pourraient nous permettre de découvrir les secrets de la créativité musicale et de son pouvoir émotionnel.

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

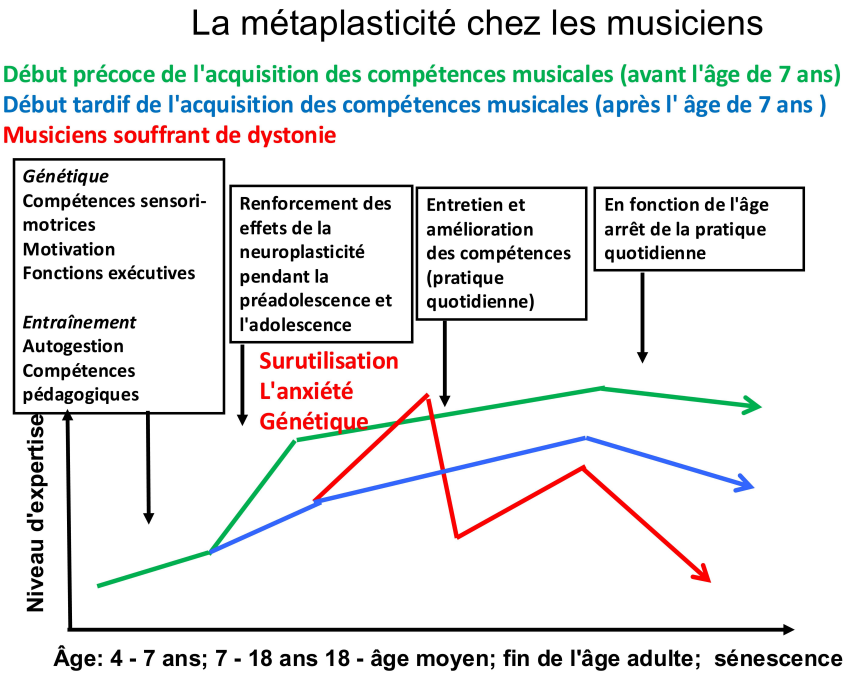


Fig. 5 : Évolution temporelle dans l'acquisition des compétences chez les débutants et les musiciens souffrant de dystonie. Les réseaux neuronaux qui sous-tendent des compétences spécifiques sont optimisés pendant l'enfance. Cela permet une acquisition plus efficace au cours de la préadolescence et de l'adolescence. Le niveau de compétence continue de s'améliorer à l'âge adulte et se stabilise lorsque les activités connexes cessent. Les réseaux neuronaux optimisés précocement sont plus stables et moins susceptibles de subir des modifications inadaptées, comme c'est le cas dans la dystonie du musicien. Dans ce cas, le début tardif de l'entraînement et des facteurs déclencheurs spécifiques peuvent entraîner une détérioration des capacités sensori-motrices.

Bibliographie

Alpheis, Stine ; Altenmüller, Eckart ; Scholz, Daniel S. (2022), « Influence of Adverse Childhood Experiences and Perfectionism on Musician's Dystonia : a Case Control Study », *Tremor and other Hyperkinetic Movement Disorders* 12, p. 8 (DOI 10.5334/tohm.687 ; PMID 35415008 ; PMCID PMC8932351).

Alpheis, Stine ; Altenmüller, E ; Scholz ; Daniel, S. (2023), « Focal Dystonia and the Stress Network : The Role of Stress Vulnerability and Adverse Childhood Experiences in the Development of Musician's Dystonia », *Advances in Neurobiology* 31, p. 23-44 (DOI 10.1007/978-3-031-26220-3*2 ; PMID 37338694).

Altenmüller, Eckart (2003), « Focal dystonia : Advances in brain imaging and understanding of fine motor control in musicians », *Hand Clinics, 19,* p. 523-538.

Altenmüller, Eckart ; Furuya, Shinichi (2016), « Brain Plasticity and the Concept of Metaplasticity in Skilled Musicians », *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 957, p. 197-208 (DOI 10.1007/978-3-319-47313-0*11 ; PMID 28035567).

Altenmüller, Eckart ; Baur, Volker ; Hofmann, Aurelie ; Lim, Vanessa ; Jabusch, Hans-Christian (2012), « Musician's cramp as manifestation of maladaptive brain plasticity : arguments from instrumental differences », Annals of the New York Academy of Sciences 1252, p. 259-265.

Altenmüller, Eckart ; Ioannou, Christos ; Lee, André (2015), « Apollo's curse : neurological causes of motor impairments in musicians », *Progress in Brain Research 217,* p. 89-106 (DOI 10.1016/bs.pbr.2014.11.022).

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

Amunts, Katrin ; Zilles, Karl (2015), « Architectonic Mapping of the Human Brain beyond Brodmann », *Neuron 88*, p. 1086-1107 (DOI 10.1016/j.neuron.2015.12.001. Review).

Amunts, Katrin ; Schlaug, Gottfried ; Jäncke, Lutz ; Steinmetz, Helmut ; Schleicher, Axel ; Dabringhaus, Andreas ; Zilles, Karl (1997), « Motor cortex and hand motor skills : Structural compliance in the human brain », *Human Brain Mapping 5*, p. 206-215.

Baharloo, Siamak ; Johnston, Paul A. ; Service, Susan. K. ; Gitschier, Jane ; Freimer, Nelson B. (1998), « Absolute pitch : An approach for identification of genetic and nongenetic components », *The American Journal of Human Genetics 62*, p. 224-231.

Baharloo, Siamak ; Service, Susan K. ; Risch, Neil ; Gitschier, Jane ; Freimer, Nelson B. (2000), « Familial aggregation of absolute pitch », *The American Journal of Human Genetics 67*, p. 755-758.

Bandettini, Peter. A (2009), « What is new in neuroimaging methods ? », *Annals of the New York Academy of Sciences 1156*, p. 260-293.

Bangert, Marc ; Altenmüller, Eckart (2003), « Mapping perception to action in piano practice : a longitudinal DC-EEG-study », *BMC Neuroscience 4*, p. 26-36.

Bangert, Marc ; Schlaug, Gottfried (2006), « Specialization of the spezialized in features of external brain morphology », *European Journal Neurosciences 24,* p. 1832-1834.

Bangert, Marc ; Peschel, Thomas ; Rotte, Michael ; Drescher, Dieter ; Hinrichs, Hinrich ; Schlaug, Gottfried ; Heinze, Hans-Joachim ; Altenmüller, Eckart (2006), « Shared networks for auditory and motor processing in professional pianists : Evidence from fMRI conjunction », *Neuroimage 30,* p. 917-926.

Baur, Volker ; Jabusch, Hans-Christian ; Altenmüller, Eckart (2011), « Behavioral factors influence the phenotype of musician's dystonia », *Movement Disorders 26,* p. 1780-1781.

Bengtsson, Sara L. ; Nagy, Zoltan ; Skare, Stefan ; Forsman, Lea ; Forssberg, Hans ; Ullén, Fredrik (2005), « Extensive piano practicing has regionally specific effects on white matter development », *Nature Neuroscience 8*, p. 1148-1150.

Bermudez, Patrick ; Lerch, Jason P ; Evans, Allan, C. ; Zatorre, Robert J. (2008), « Neuroanatomical correlates of musicianship as revealed by Cortical Thickness and Voxel-Based Morphometry », *Cerebral Cortex 19,* p. 1583-1596.

Brown, Rachel, M. ; Chen, Joyce, L. ; Hollinger, Avrum ; Palmer, Caroline ; Penhune, Virginia, B. ; Zatorre, Robert J. (2013), « Repetition suppression in auditory-motor regions to pitch and temporal structure in music », *Journal of Cognitive Neuroscience 25*, p. 313-328.

Brown, Rachel M. ; Penhune, Virginia, B. ; Zatorre, Robert J. (2015), « Expert music performance : cognitive, neural, and developmental bases », *Progress in Brain Research 217*, p. 57-86.

Chen, Joyce L. ; Penhune, Virginia, B. ; Zatorre, Robert J. (2008), « Moving on time : Brain network for auditory-motor synchronization is modulated by rhythm complexity and musical training », *Journal of Cognitive Neuroscience 20*, p. 226-239.

Corrigall, Kathleen, A. ; Schellenberg, Glenn E. ; Misura, Nicole M. (2013), « Music training, cognition, and personality », *Frontiers in Psychology 4*, p. 222.

Doll-Lee Johanna ; Passarotto, Edoardo ; Altenmüller, Eckart ; Lee, Andrè (2024), « Gender Differences in Task Specific Dystonia : What Can we Learn from Musician's Dystonia ? », *Movement Disorders Clinical Practice* 11(5), p. 526-533 (DOI 10.1002/mdc3.14015).

Enders, Luise ; Spector, June, T. ; Altenmüller, Eckart ; Schmidt, Alexander ; Klein, Christine ; Jabusch, Hans-Christian (2011), « Musician's dystonia and comorbid anxiety : two sides of one coin ? », *Movement Disorders* 26(3), p. 539-542 (DOI 10.1002/mds.23607).

Ericsson, Anders K. ; Lehmann, Andreas C. (1996), « Expert and exceptional performance : evidence of maximal adaptation to task constraints », *Annual Review of Psychology 47*, p. 273-305.

Ericsson, Anders, K. ; Krampe, Ralf, T. ; Tesch-Römer, Clemens (1993), « The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance », *Psychological Reviews 100*, p. 363-406.

Furuya, Shinichi ; Klaus, Matthias ; Nitsche, Michael A. ; Paulus, Walter ; Altenmüller, Eckart (2014), « Ceiling effects prevent further improvement of transcranial stimulation in skilled musicians », *Journal of Neuroscience 34,* p. 13834-13839.

Gärtner, Hanna ; Minnerop, Martina ; Pieperhoff, Peter ; Schleicher, Axel ; Zilles, Karl ; Altenmüller, Eckart ; Amunts, Katrin (2013), « Brain morphometry shows effects of long-term musical practice in middle-aged keyboard players », *Frontiers in Psychology* 4 (DOI 10.3389/fpsyg.2013.00636).

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

Gaser, Christian ; Schlaug, Gottfried (2003), « Brain structures differ between musicians and non-musicians », Journal of Neuroscience 23(27), p. 9240-9245.

Granert, Oliver ; Peller, Martin ; Jabusch, Hans-Christian ; Altenmüller, Eckart ; Siebner, Hartwig, R. (2011), « Sensorimotor skills and focal dystonia are linked to putaminal grey-matter volume in pianists », *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry 82,* p. 1225-1231.

Gregersen, Peter K. ; Kowalsky, Elena ; Kohn, Nina ; Marvin, Elizabeth W. (2001), « Early childhood music education and predisposition to absolute pitch : Teasing apart genes and environment », *American Journal of Medical Genetics 98*, p. 280-282.

Gingras, Bruno ; Honing, Henkjan ; Peretz, Isabelle ; Trainor, Laurel J. ; Fisher, Simon E. (2015), « Defining the biological bases of individual differences in musicality », Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Biological. Sciences 370, 20140092 (DOI 10.1098/rstb.2014.0092).

Haslinger, Bernhard ; Erhard, Peter ; Altenmüller, Eckart ; Schroeder, Ulrike ; Boecker, Henning ; Ceballos-Baumann, Andres O. (2005), « Transmodal sensorimotor networks during action observation in professional pianists », *Journal of Cognitive Neuroscience 17,* p. 282-293.

Henry, Douglas E. ; Chiodo, Antony E. ; Yang, Weibin (2011), « Central nervous system reorganization in a variety of chronic pain states : a review », Physical Medicine and Rehabilitation Journal Dec. 3(12), p. 1116-1125 (DOI 10.1016/j.pmrj.2011.05.018).

Herholz, Sibylle C. ; Coffey, Emily B. ; Pantev, Christo ; Zatorre, Robert J. (2016), « Dissociation of Neural Networks for Predisposition and for Training-Related Plasticity in Auditory-Motor Learning », Cerebral Cortex 26, p. 3125-3134 (DOI 10.1093/cercor/bhv138).

Hyde, Krista L. ; Lerch, Jason ; Norton, Andrea ; Forgeard, Maria ; Winner, Ellen ; Evans, Allan, C. ; Schlaug, Gottfried (2009), « Musical training shapes structural brain development », Journal of Neurosciences 29, p. 3019-3025.

Ioannou, Christos, I. ; Altenmüller, Eckart (2014), « Psychological characteristics in musician's dystonia : A new diagnostic classification », *Neuropsychologia 81*, p. 80-88.

Ioannou, Christos I. ; Furuya, Shinichi ; Altenmüller, Eckart (2016), « The impact of stress on motor performance in skilled musicians suffering from focal dystonia : Physiological and psychological characteristics », Neuropsychologia 85, p. 226-236 (DOI 10.1016/j.neuropsychologia.2016.03.029).

Jabusch, Hans-Christian ; Altenmüller, Eckart (2004), « Anxiety as an aggravating factor during onset of focal dystonia in musicians », *Medical Problems of Performing Artists 19,* p. 75-81.

Koelsch, Stefan (2011), « Toward a neural basis of music perception – a review and updated model », Frontiers in Psychology 2, p. 110 (DOI 10.3389/fpsyg.2011.00110).

Krampe, Ralf ; Ericsson, Anders K. (1996), « Maintaining excellence : Deliberate practice and elite performance in young and older pianists », Journal of Experimental Psychology : General 125, p. 331-359.

Kraus, Nina ; McGee, Therese J ; Koch, Dawn B. (1998), « Speech sound representation, perception and plasticity : a neurophysiologic perspective », *Audiology and Neurootology 3*, p. 168-182.

Lee, André ; Eich, Christine ; Ioannou, Christos I. ; Altenmüller, Eckart (2016), « Life satisfaction of musicians with focal dystonia », *Occupational Medicine*. 65(5), p. 380-385 (DOI 10.1093/occmed/kqv038).

Lehmann, Andreas, C ; Ericsson, Anders K. (1998), « The historical development of expert performance : public performance of music », in : Steptoe, Andrew (éd.), *Genius and the Mind*, Oxford, Oxford University Press, p. 67-97.

Lim, Vanessa K. ; Altenmüller, Eckart (2003), « Musician's cramp : Instrumental and gender differences », *Medical Problems of Performing Artists 18,* p. 21-27.

Macnamara, Brooke N. ; Maitra, Megha (2019), « The role of deliberate practice in expert performance : revisiting Ericsson, Krampe & Tesch-Römer », *Royal Society, Open Science* 21 ;6(8) :190327 (DOI 10.1098/rsos.190327 ; PMID 31598236 ; PMCID PMC6731745).

Meinz, Elizabeth J. (2000), « Experience-based attenuation of age-related differences in music cognition tasks », Psychology of Aging 15, p. 297-312.

Mosing, Miriam A. ; Madison, Guy ; Pedersen, Nancy L. ; Kuja-Halkola, Ralf ; Ullen, Fredrik (2014), « Practice does not make perfect : No causal effect of music practice on music ability », Psychological Science 43, p. 1-9.

Mosing, Miriam A. ; Verweij, Karin J. H. ; Hambrick, David Z. ; Pedersen, Nancy L. ; Ullén, Fredric (2024), « Testing the Deliberate Practice Theory : Does Practice Reduce the Heritability of Musical Ex-

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

pertise ? » *Journal of Intelligence* 8 ;12(9), p. 87 (DOI 10.3390/jintelligence12090087 ; PMID 39330466 ; PMCID PMC11433073).

Oechslin, Mathias S. ; Imfeld, Adrian ; Loenneker, Thomas ; Meyer, Martin ; Jäncke, Lutz (2010), « The plasticity of the superior longitudinal fasciculus as a funtion of musical expertise : a diffusion tensor imaging study », *Frontiers in Human Neurosciences* 3(76), p. 1-12.

Oztürk, Ahmed H. ;Tascioglu, Beliz ; Aktekin, Mehmet ; Kurtoglu, Zeliha ; Erden, Ilhan (2002), « Morphometric comparison of the human corpus callosum in professional musicians and non-musicians by using in vivo magnetic resonance imaging », *Journal of Neuroradiology. 29*, p. 29-34.

Passarotto, Edoardo ; Doll-Lee, Johanna ; Altenmüller, Eckart ; Lee André (2023), « Practice behaviors as trigger factor for the onset of Musicians' Dystonia », *Journal of Neural Transmission* ; 130(12). p. 1561-1569 (DOI 10.1007/s00702-023-02689-4 ; Epub 2023 Aug 26 ; PMID 37633870 ; PMCID PMC10682052).

Ragert, Patrick ; Schmidt, Alexander ; Altenmüller, Eckart ; Dinse, Hubert R. (2003), « Superior tactile performance and learning in professional pianists : evidence for meta-plasticity in musicians », *European Journal of Neuroscience 19(2),* p. 473-478.

Salimpoor, Valorie N. ; van den Bosch, Iris ; Kovacevic, Natasa ; McIntosh, Antony R. ; Dagher, Alain ; Zatorre, Robert J. (2013), « Interactions between the nucleus accumbens and auditory cortices predict music reward value », Science 340, p. 216-219 (DOI 10.1126/science.1231059).

Schlaug, Gottfried (2001), « The brain of musicians : A model for functional and structural plasticity », *Annals of the New York Academy of Sciences* 930, p. 281-299.

Schlaug, Gottfried (2015), « Musicians and music making as a model for the study of brain plasticity », Progress in Brain Research 217, p. 37-55 (DOI 10.1016/bs.pbr.2014.11.020).

Schlaug, Gottfried ; Jäncke, Lutz ; Huang, Yanxiong ; Staiger, Jochen F. ; Steinmetz, Helmuth (1995), « Increased corpus callusum size in musicians », *Neuropsychologia 33*, p. 1047-1055.

Schneider, Peter ; Scherg, Michael ; Dosch, Günter H. ; Specht, Hans J. ; Gutschalk, Alexander ; Rupp, Andrè (2002), « Morphology of Heschl's gyrus reflects enhanced activation in the auditory cortex of musicians », *Nature Neuroscience 5*, p. 688-694.

Schneider, Peter ; Sluming, Vanessa ; Roberts, Neil ; Scherg, Michael ; Goebel, Rainer ; Specht, Hans J. ; Dosch, Günter H. ; Bleeck, Stephan ; Stippich, Christoph ; Rupp, André (2005), « Structural and functional asymmetry of lateral Heschl's gyrus reflects pitch perception preference », Nature Neuroscience 8, p. 1241-1247.

Schmidt, Alexander ; Jabusch, Hans-Christian ; Altenmüller, Eckart ; Hagenah, Jannis ; Brüggemann, Norbert ; Lohmann, Katja ; Enders, Leonie ; Kramer, Patricia L ; Saunders-Pullman, Rachel ; Bressman, Susan B. ; Münchau, Alexander ; Klein, Christine (2009), « Etiology of musicians dystonia : Familial or environmental ? », Neurology 72, p. 1248-1254.

Schmidt, Alexander ; Jabusch, Hans-Christian ; Altenmüller, Eckart ; Kasten, Meike ; Klein, Christine (2013), « Challenges of making music : What causes musician's dystonia ? », *Journal of the American Medical Association, Neurology 70*, p. 1456-1459.

Sotiropoulos, Marinos G ; Anagnostouli, Maria (2021), « Genes, brain dynamics and art : the genetic underpinnings of creativity in dancing, musicality and visual arts », *Journal of Integrative Neuroscience* 20, p. 1095-1104 (DOI 10.31083/j.jin2004110 ; PMID 34997732).

Steele, Christopher J. ; Bailey, Jennifer A. ; Zatorre, Robert J. ; Penhune, Virginia B. (2013), « Early musical training and white-matter plasticity in the corpus callosum : Evidence for a sensitive period », *Journal of Neuroscience 33*, p. 1282-1290.

Stewart, Lauren ; Henson, Rik ; Kampe, Knut ; Walsh, Vincent ; Turner, Robert ; Frith, Uta (2003), « Brain changes after learning to read and play music », *Neuroimage 20,* p. 71-83.

Vaquero, Lucia ; Hartmann, Karl ; Ripolles, Pablo ; Rojo, Nuria ; Sierpowska, Joanna ; François, Clément ; Càmara, Estela ; van Vugt, Floris T. ; Mohammadi, Bahram ; Samii, Amir ; Münte, Thomas F. ; Rodríguez-Fornells, Antoni ; Altenmüller, Eckart (2016), « Structural neuroplasticity in expert pianists depends on the age of musical training onset », *Neuroimage 126,* p. 106-119 (DOI 10.1016/j.neuroimage.2015.11.008).

Worlitzsch, Attila ; Altenmüller, Eckart ; Angerstein, Wolfgang ; Blum, Jochen ; Görtz, Wolfram ; Haslinger, Bernhard ; Jabusch, Hans-Christian ; Lee, Andrè ; Kahlen, Ulrike ; Richter, Bernhard ; Schmidt, Alexander ; Spahn, Claudia ; Steinmetz, Anke (2025), « Development of the annual incidence of musicians' dystonia from 1994-2021 », *Medical Problems of Performing Artists* (sous presse).

Worschech, Florian ; Altenmüller, Eckart ; Jünemann, Katrin ; Sinke, Christopher ; Krüger, Tillmann, H .C. ; Scholz, Daniel S. ; Müller, Cecile ; Kliegel Matthias ; James, Clara E. ; Marie, Damien (2022), « Evidence of

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748

cortical thickness increases in bilateral auditory brain structures following piano learning in older adults », *Annals of the New York Academy of Sciences*, July, 1513(1), p. 21-30 (DOI 10.1111/nyas.14762 ; Epub 2022 Mar 15).

Zatorre, Robert J. ; Chen, Joyce L. ; Penhune, Virginia B. (2007), « When the brain plays music : Auditory – motor interactions in music perception and production », Nature Reviews Neuroscience 8, p. 547-558.

Published in : PINEDA, Ester ; FÖLLMI, Beat (dir.), *Musique et transmission à la lumière des sciences cognitives*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005748, doi : 10.17184/eac.9782813005748