

Hauteurs musicales : Quand l'espace s'en mêle

Pascale Lidji ^(1, 2) et *Régine Kolinsky* ^(1, 3)

(1) Unité de Recherche en Neurosciences Cognitives, Université Libre de Bruxelles – ULB, Belgique; (2) Laboratoire BRAMS, Université de Montréal, Québec, Canada
(3) Fonds de la Recherche scientifique – FNRS, Belgique

Résumé

Cet article fait le point sur les connaissances actuelles concernant les interactions entre traitements musicaux et spatiaux. Après avoir passé en revue la littérature sur les effets de la pratique et de l'écoute musicales sur les habiletés visuo-spatiales, nous résumons les données récentes suggérant que les hauteurs musicales évoquent des associations spatiales (effets SPARC et SMARC). Sur le plan théorique, ces deux ensembles de données suggèrent l'existence de liens étroits entre musique et espace. En effet, les hauteurs musicales, comme d'autres dimensions activant la notion de magnitude, pourraient activer les réseaux neuronaux impliqués dans les traitements spatiaux.

Mots-clés: Hauteurs musicales, visuo-spatial, effet Mozart, expertise musicale, effet SPARC, effet SMARC, magnitude, lobe pariétal, amusie congénitale.

Keywords : Musical pitch, visuo-spatial, Mozart effect, musicianship, SPARC effect, SMARC effect, magnitude, parietal lobe, congenital amusia

Correspondance : Pascale Lidji, UNESCOG, ULB Université Libre de Bruxelles, CP 191 B-1050 Bruxelles, Belgique
plidji@ulb.ac.be +32 2 650 26 40, fax: + 32 2 650 22 09

Les chanteurs parlent de voix de poitrine et de voix de tête ; la voix de basse est grave alors qu'un son aigu est haut perché... Ces analogies quotidiennes entre musique et espace trouvent-elles écho dans notre fonctionnement cognitif ? Nous tenterons de répondre à cette question en passant en revue la littérature récente dans deux domaines. Nous aborderons d'abord les effets de l'écoute et de la pratique musicales sur les compétences visuo-spatiales des individus qui s'y adonnent. Nous évoquerons ensuite la découverte récente de représentations d'ordre spatial associées aux hauteurs musicales. Pour conclure, nous discuterons de la composante commune aux traitements musicaux, spatiaux, temporels et numériques.

RELATIONS ENTRE ÉCOUTE MUSICALE, PRATIQUE MUSICALE ET HABILITÉS VISUO-SPATIALES

L'étude des interactions entre traitements musicaux, spatiaux et numériques s'est essentiellement développée dans la dernière décennie (pour une revue récente, voir Schellenberg, 2006a). L'engouement pour cette thématique est au moins partiellement lié à l'impact médiatique hors du commun des expériences qui ont rapporté « l'effet Mozart » (Rauscher, Shaw, & Ky, 1993, 1995, Steele, Dalla Bella, Peretz, Dunlop, Dawe, Humphrey, et al., 1999) et à la légende scientifique qu'elles ont entraîné (Bangerter & Heath, 2004). Cet effet transitoire de l'exposition à une sonate de Mozart sur la performance à une tâche de quotient intellectuel visuo-spatial (la tâche de « Paper Folding & Cutting » de l'échelle de Stanford-Binet, cf. Thorndike, Hagen, & Sattler, 1986) a constitué l'un des premiers arguments en faveur de transferts entre traitements musicaux et spatiaux. Les auteurs (Rauscher et al., 1995) ont fourni une interprétation forte du phénomène: selon eux, l'écoute de la musique de Mozart amorcerait l'activation des neurones impliqués dans les traitements visuo-spatio-temporels. Ils justifient cette conclusion, entre autres, par des données électroencéphalographiques indiquant que l'écoute de la sonate en question favorise la cohérence de l'activité des régions céré-

brales impliquées dans les tâches spatiales (Sarnthein, vonStein, Rappelsberger, Petsche, Rauscher, & Shaw, 1997) et par la découverte d'un effet similaire chez les rats (Rauscher, Robinson, & Jens, 1998; mais voir Steele, 2006 pour une critique).

La portée de ces affirmations est toutefois limitée par divers facteurs, tels que la difficulté à répliquer l'effet (McKelvie & Low, 2002; Steele, Bass, & Crook, 1999) ou le fait qu'il puisse être expliqué par des paramètres non spécifiques à la musique. Ainsi, selon une idée de plus en plus influente, l'effet dit « Mozart » serait plutôt lié à l'amélioration de l'humeur et à l'augmentation du degré d'éveil (*arousal*) consécutifs à l'écoute d'une musique au tempo rapide et en mode majeur (Husain, Thompson, & Schellenberg, 2002; Schellenberg, Nakata, Hunter, & Tamoto, 2007; Thompson, Schellenberg, & Husain, 2001) et ne dépendrait pas de la musique de Mozart en elle-même mais plutôt de la préférence des participants pour un style de musique spécifique ou pour une autre activité qu'ils jugent intéressante et qui donc les stimule (Nantais & Schellenberg, 1999; Schellenberg & Hallam, 2005).

Le débat sur l'effet Mozart est loin d'être clos, comme l'illustrent les publications récentes sur son occurrence dans d'autres situations expérimentales (Ho, Mason, & Spence, 2007) et sur ses applications dans diverses pathologies (Johnson, Shaw, Vuong, Vuong, & Cotman, 2002; Lahiri & Duncan, 2007). Mais cet effet controversé nous intéresse surtout parce qu'il a suscité l'intérêt pour l'étude des interactions entre traitements musicaux et visuo-spatiaux, même si dans ce cadre il a souvent été confondu avec d'autres types de recherches examinant, cette fois, les liens entre la pratique musicale active et les compétences cognitives générales (Rauscher & Hinton, 2006), y inclus les habiletés visuo-spatiales.

Les travaux faisant état de l'impact de la *pratique* musicale sur les compétences spatiales se basent sur deux types d'approches: soit sur une comparaison entre musiciens et non musiciens à l'âge adulte (Brochard, Dufour, & Despres, 2004; Costa-Giomi, 2004; Sluming, Brooks, Howard, Downes, & Roberts, 2007), soit sur une comparaison entre enfants musiciens et non musiciens, parfois couplée à une approche longi-

tudinale (Cheek & Smith, 1999; Costa-Giomi, 2004; Gardiner, Fox, Knowles, & Jeffrey, 1996; Graziano, Peterson, & Shaw, 1999; Schellenberg, 2004).

En ce qui concerne la comparaison entre adultes, Brochard, Dufour et Desprès (2004) ont observé que les musiciens présentent une performance supérieure à celle des non musiciens dans des tâches évaluant la perception et l'imagerie visuo-spatiales. La rapidité de discrimination visuelle des participants était évaluée alors qu'ils devaient indiquer de quel côté d'une ligne horizontale ou verticale se trouvait un point lumineux. Dans une autre condition, dite d'imagerie mentale, la ligne de référence devait être imaginée par les sujets. Les musiciens étaient plus rapides que les non musiciens, et ce particulièrement dans la condition d'imagerie mentale verticale. La pratique musicale intense semble donc avoir un effet bénéfique sur les habiletés visuo-spatiales. Selon Brochard et al. (2004), ce bénéfice proviendrait à la fois de la stimulation des habiletés perceptivo-motrices par la pratique d'un instrument et de l'entraînement des traitements visuo-spatiaux verticaux par la lecture musicale.

Dans le même ordre d'idées, Sluming et al. (2007) ont récemment observé que la performance de musiciens professionnels dans une tâche de rotation mentale à trois dimensions était supérieure, en termes à la fois de rapidité et de taux d'erreurs, à celle de participants non musiciens. De plus, la performance était corrélée négativement avec le nombre d'années d'expérience musicale, ce qui suggère que la pratique musicale est bien à l'origine de la différence observée (voir aussi Costa-Giomi, 2004). Sur le plan neuro-fonctionnel, seuls les musiciens recrutaient l'aire de Broca pour réaliser les tâches de rotation mentale, un effet lié, selon Sluming et al., à l'implication de cette région dans la lecture à vue de partitions. La lecture musicale impliquerait, en effet, une conversion rapide de symboles visuels en actions motrices. Les conclusions de cette étude rejoignent ainsi celles de Brochard et al. (2004): la lecture musicale, couplée aux associations sensori-motrices nécessaires à la pratique d'un instrument, contribuerait à la performance supérieure des musiciens dans des tâches visuo-spatiales.

Si les musiciens sont de meilleurs « spatialistes », qu'en est-il des individus situés à l'autre extrémité du spectre du talent musical? Douglas et Bilkey (2007) ont examiné les compétences visuo-spatiales de sujets atteints d'amusie congénitale, un déficit spécifique de la perception et de la production musicales (e.g., Ayotte, Peretz, & Hyde, 2002; Peretz, 2001) généralement circonscrit aux traitements mélodiques (Peretz et al., 2002). À l'opposé des musiciens, les individus amusiques étudiés par Douglas et Bilkey (2007) présentaient une performance significativement inférieure à celle de sujets de contrôle dans une tâche de rotation mentale. De plus, dans une autre étude récente (Peretz et al., 2008), des personnes amusiques déclaraient éprouver plus de difficultés d'ordre spatial que des individus non atteints.

En somme, dans des tâches visuo-spatiales, les musiciens présentent une meilleure performance que les non musiciens (Brochard et al., 2004; Sluming et al., 2007), alors que les individus amusiques manifestent un déficit (Douglas & Bilkey, 2007). Ces associations entre traitements spatiaux et musicaux ne permettent toutefois pas de conclure quant à la direction des influences qui les sous-tendent (Stewart & Walsh, 2007). Selon l'interprétation classique, la pratique musicale favoriserait le développement des habiletés visuo-spatiales; ainsi, l'absence de pratique musicale et/ou la moindre exposition volontaire à la musique caractéristique de certains individus amusiques (McDonald & Stewart, 2008) aurait pour conséquence un développement incomplet des capacités de traitement visuo-spatial. Mais il est tout aussi plausible que des capacités visuo-spatiales exceptionnelles constituent un pré-requis pour devenir un musicien de talent et qu'un déficit de ces capacités entraîne un déficit de traitement musical, et donc l'amusie.

Une solution pour déterminer le sens des associations entre traitements spatiaux et musicaux et donc pour en spécifier la causalité consisterait à étudier l'impact de l'apprentissage d'un instrument et de la lecture musicale sur les habiletés visuo-spatiales et numériques d'enfants en cours d'apprentissage de la musique. De telles études ont été réalisées (Cheek & Smith, 1999; Costa-Giomi, 1999, 2004; Gardiner et al., 1996;

Graziano et al., 1999), mais présentent souvent des faiblesses méthodologiques (pour une revue, voir Schellenberg, 2001). Le premier écueil potentiel repose sur le choix d'une approche corrélacionnelle dans laquelle musiciens et non musiciens sont comparés sans disposer d'informations sur leur niveau cognitif antérieur à l'entraînement musical (Cheek & Smith, 1999; Costa-Giomi, 2004; Schellenberg, 2006b). Dans de tels dispositifs, la pratique musicale est susceptible d'être confondue avec des variables scolaires et socio-économiques pouvant favoriser la performance dans les tâches numérico-spatiales.

Si plusieurs recherches ont évité ce problème en testant les enfants tant avant qu'après l'introduction des cours de musique (Costa-Giomi, 1999; Rauscher & Zupan, 2000), le choix du groupe de contrôle reste souvent problématique. En effet, alors que le groupe d'enfants « musiciens » est exposé à une activité extrascolaire régulière recrutant différents traitements cognitifs de haut niveau, le groupe de contrôle de ces études n'effectuait aucune activité extrascolaire comparable. Par conséquent, la performance visuo-spatiale supérieure des enfants suivant des cours de musique individuels (Costa-Giomi, 1999) ou collectifs (Rauscher et al., 2000) pourrait simplement être liée à la stimulation cognitive supplémentaire liée aux séances d'entraînement. Par ailleurs, cet effet semble relativement temporaire, puisque la différence entre les groupes étudiés par Costa-Giomi avait disparu après trois ans de pratique musicale. Les conclusions de ces études sont donc à prendre avec précaution.

Dans une étude apparemment mieux contrôlée, Schellenberg (2004) a observé une augmentation plus importante du QI général chez des enfants de 6 ans qui avaient suivi des cours de musique pendant un an, par rapport à des enfants qui avaient suivi des cours de théâtre ou qui n'avaient suivi aucun cours complémentaire. Si l'introduction d'un groupe de contrôle effectuant une activité extrascolaire non musicale et la répartition aléatoire des enfants dans les groupes expérimentaux et de contrôle constituent un progrès méthodologique indéniable, le traitement des données effectué par l'auteur est discutable (Steele, 2005/2006). En

effet, Schellenberg a comparé deux groupes d'enfants « musiciens » (l'un ayant suivi des cours de piano, l'autre de chant) à la moyenne des deux groupes de contrôle (le groupe sans activité extrascolaire et celui faisant du théâtre). Le groupe sans activité extrascolaire pourrait donc être le seul à l'origine de la petite différence observée, ce que suggèrent d'ailleurs les données. Nous pourrions donc être ici à nouveau en présence d'un effet d'entraînement qui n'est pas spécifiquement lié à l'apprentissage de la musique.

Les travaux plus récents de Schellenberg (2006b) semblent toutefois confirmer l'idée d'un lien entre musique et compétences cognitives: la pratique musicale aurait des effets bénéfiques sur le QI et sur la réussite scolaire d'enfants de 6 à 11 ans, y compris lorsque les variables socio-économiques sont contrôlées statistiquement. Contrairement à ce qu'a observé Costa-Giomi (1999), ces effets bénéfiques semblent perdurer, puisqu'une corrélation similaire est observée chez de jeunes adultes qui avaient suivi ou non des cours de musique dans l'enfance (Schellenberg, 2006b).

Toutefois, si les travaux de Schellenberg (2004, 2006b) sont, à notre connaissance, les seuls à contrôler de manière relativement satisfaisante les activités du groupe de contrôle et les variables socio-économiques qui pourraient affecter les performances cognitives, il faut souligner que cet auteur n'a pas mis en évidence d'effet de la pratique musicale qui porterait spécifiquement sur les compétences visuo-spatiales. D'autres études suggèrent d'ailleurs un effet de l'écoute musicale sur la pensée créative (Schellenberg et al., 2007) ainsi qu'un effet de la pratique musicale sur la mémoire verbale (Ho, Cheung, & Chan, 2003) et sur les compétences phonologiques et prosodiques (Anvari, Trainor, Woodside, & Levy, 2002; Besson, Schön, Moreno, Santos, & Magne, 2007; Thompson, Schellenberg, & Husain, 2004).

En conséquence, bien que plusieurs types de données suggèrent que la pratique et, dans une moindre mesure, l'écoute musicale exercent des effets bénéfiques sur les compétences cognitives et visuo-spatiales, il est difficile de savoir si ces effets sont spécifiques ou s'ils ne sont qu'un

aspect d'effets plus généraux de la musique sur la cognition (Schellenberg, 2004, 2005).

Un autre courant de recherche a cependant apporté récemment de nouveaux indices en faveur de l'existence de liens entre les traitements musicaux et spatiaux. Il s'agit des travaux visant à mettre en évidence la nature des représentations mentales associées aux hauteurs musicales (Cohen Kadosh, Brodsky, Levin, & Henik, 2008; Lidji, Kolinsky, Lochy, & Morais, 2007; Rusconi, Kwan, Giordano, Umiltà, & Butterworth, 2006).

REPRÉSENTATIONS SPATIALES DES HAUTEURS MUSICALES

Une hypothèse séduisante pour expliquer les liens controversés entre la musique et les traitements spatiaux serait que les processus musicaux partagent des composantes de traitement avec les processus visuo-spatiaux, comme cela est déjà établi dans le cas du traitement numérique.

L'existence de liens entre traitements numériques et spatiaux sous la forme d'une représentation mentale de nature spatiale est, en effet, largement documentée (pour une revue récente, voir Hubbard, Piazza, Pinel, & Dehaene, 2005). Un ensemble d'effets expérimentaux suggère que les nombres sont conceptualisés comme des positions sur une ligne mentale compressive orientée de gauche à droite ou de bas en haut (Dehaene, 2001; Fias & Fischer, 2005; Ito & Hatta, 2004). Selon l'idée de compressivité, les petits nombres seraient plus espacés sur la ligne mentale que les grands, la représentation des nombres de faible magnitude étant donc plus précise. Cette idée se base sur l'effet de magnitude (Parkman, 1971): il est plus rapide de comparer des nombres de petite magnitude que des nombres de grande magnitude. De plus, cette ligne mentale semble constituer une représentation analogique, comme l'indique l'effet de distance (Moyer & Landauer, 1967), à savoir, le fait que le temps requis pour comparer deux nombres diminue si l'écart numérique entre ces nombres augmente. Enfin, l'orientation de cette représentation spatiale

des nombres a été mise en évidence grâce à l'effet *SNARC* (Spatial Numerical Association of Response Codes, Dehaene, Bossini & Giraux, 1993). Dans des tâches comme le jugement de parité avec des réponses manuelles par pression de boutons disposés horizontalement, les réponses aux nombres de faible magnitude sont plus rapides du côté gauche que du côté droit, et, inversement, les réponses aux nombres de grande magnitude sont plus rapides du côté droit que du côté gauche (Dehaene et al., 1993; Fias, 2001; Fias, Brysbaert, Geypens, & d'Ydewalle, 1996; Nuerk, Wood, & Willmes, 2005). Un effet SNARC vertical a également été observé à plusieurs reprises (Gevers, Lammertyn, Notebaert, Verguts, & Fias, 2006; Ito & Hatta, 2004; Schwarz & Keus, 2004). L'observation de ces effets de distance, de magnitude et de l'effet SNARC lors de tâches dans lesquelles aucun jugement explicite de magnitude n'est exigé (comme décider si le nom d'un chiffre contient le phonème /c/ ou juger de sa couleur, e.g. Brysbaert, 1995; Dehaene et al., 1993; Fias et al., 1996; Fias, Lauwereyns, & Lammertyn, 2001; Reynvoet, Brysbaert, & Fias, 2002) suggère que cette représentation spatiale serait activée automatiquement (Gevers et al., 2006).

Des données neuropsychologiques et d'imagerie cérébrale soutiennent l'idée selon laquelle cette association entre représentations numériques et spatiales est liée à l'activation de réseaux neuronaux communs, situés dans le cortex pariétal (pour une revue récente, voir Hubbard et al., 2005). En effet, des personnes devenues héminégligentes suite à une lésion cérébrale pariétale présentent un biais « vers la droite » lorsqu'ils doivent indiquer la médiane de deux chiffres, c'est-à-dire qu'ils répondent par un chiffre de plus grande magnitude que celui attendu (Zorzi, Priftis, & Umiltà, 2002). De plus, les aires cérébrales pariétales activées lors de la comparaison de nombres (Sandrini, Rossini, & Miniussi, 2004) correspondent de manière étonnante à celles impliquées dans les activités visuo-spatiales (e.g., Andersen, Snyder, Bradley, & Xing, 1997; Colby & Goldberg, 1999; Göbel, Walsh, & Rurshworth, 2001). Ceci nous ramène à la musique: ces régions peuvent également être activées lors de la comparaison de hauteurs musicales (Schmithorst & Holland, 2003).

Il se pourrait donc que les hauteurs musicales évoquent des associations spatiales similaires à celles classiquement attribuées à la séquence des chiffres. L'analogie entre magnitude numérique et hauteur musicale, tout comme l'idée d'une représentation spatiale des hauteurs musicales, était d'ailleurs présente dans les premiers modèles représentationnels de la hauteur musicale. Ces modèles proposaient, en effet, des représentations unidimensionnelles rectilignes assez similaires à celles de la ligne mentale numérique évoquée supra (Beck & Shaw, 1961; Stevens, Volkman, & Newman, 1937); les auteurs faisaient d'ailleurs explicitement référence à la « magnitude psychologique de la hauteur ». Ces modèles unidimensionnels ne permettaient toutefois pas de rendre compte du phénomène *d'équivalence d'octave* (Burns & Ward, 1982), c'est-à-dire du fait que deux notes identiques séparées d'une octave (e.g., deux « do », un grave et un aigu) sont perçues comme plus similaires entre elles que deux notes plus proches en termes de fréquence fondamentale (e.g., « do » et « mi » au sein d'une même octave). C'est pourquoi les modèles ultérieurs ont intégré cette dimension au sein d'une structure multidimensionnelle hélicoïdale dans laquelle les différentes octaves sont représentées distinctement de la distance entre les notes d'une seule octave (Shepard, 1982). Mais quel que soit le modèle choisi, la hauteur y est systématiquement associée à un axe vertical, avec les notes graves en bas et les aiguës en haut.

L'idée d'une représentation spatiale des hauteurs musicales semble donc établie de longue date, y compris dans les métaphores associées à la musique (Eitan & Timmers, 2006). Pourtant, jusque très récemment, les bases empiriques de ces modèles étaient fort minces. Si un équivalent de l'effet de distance numérique avait été observé par Shepard (1982) dans une tâche de comparaison de hauteurs, suggérant que les hauteurs musicales étaient représentées de manière analogique, aucune donnée ne justifiait l'orientation de la représentation spatiale musicale. Cette lacune a été comblée par un courant de recherche récent qui a adapté les tâches utilisées pour mettre en évidence les caractéristiques de la ligne mentale numérique afin de tester directement l'hypothèse d'une repré-

sentation spatiale des hauteurs musicales. Ainsi, l'effet de distance a été répliqué pour les hauteurs musicales (Cohen Kadosh et al., 2008): dans des tâches de comparaison de hauteur de notes, le patron des temps de réponse est fort similaire à celui obtenu pour la comparaison de quantités numériques. Ceci semble confirmer l'idée d'une représentation linéaire et analogique des hauteurs. Toutefois, dans une tâche de discrimination (même-différent) de hauteurs dans laquelle la relation entre les notes présentées était moins pertinente, les résultats étaient plutôt compatibles avec une représentation spatiale bidimensionnelle. En effet, l'équivalence d'octave s'est reflétée dans les temps de réaction: les participants avaient tendance à répondre plus rapidement à des notes proches l'une de l'autre au sein de la gamme (par exemple, do et ré) même si celles-ci étaient séparées par une octave. Si ces données semblent renforcer l'idée d'une représentation des notes d'une même octave sur une ligne mentale, d'autres travaux devront s'atteler à déterminer plus précisément les relations entre les notes appartenant à des octaves différentes, puisque leur traitement semble modulé par la tâche.

En ce qui concerne l'orientation de cette représentation spatiale des hauteurs musicales, deux recherches récentes ont adapté à l'étude des hauteurs musicales les procédures ayant mis en évidence l'effet SNARC. Dans trois expériences, Rusconi, Kwan, Giordano, Umiltà et Butterworth (2006) ont confronté des participants non musiciens et musiciens à des tâches de jugement de timbre ou de hauteur de notes de musique, avec un dispositif de réponse disposé horizontalement ou verticalement. Quelle que soit leur expertise musicale, les participants répondaient plus rapidement aux notes graves lorsqu'elles étaient associées au bouton inférieur et aux notes aiguës lorsqu'elles étaient associées au bouton supérieur d'un dispositif de réponse orienté verticalement (sur le plan transversal) par rapport au sujet. Ce résultat était observé non seulement dans la tâche portant sur la hauteur, mais aussi dans celle portant sur le timbre, alors que dans celle-ci la hauteur musicale constituait une variable non pertinente. Cet effet a été intitulé *SMARC* (*Spatial Musical Association of Response Codes*). Un effet similaire était observé sur un axe horizontal, avec une as-

sociation des notes graves au côté gauche et des notes aiguës au côté droit. Toutefois, cette association horizontale semblait activée de manière moins automatique que son équivalent vertical, car seuls les musiciens la présentaient dans la tâche de jugement de timbre. Rusconi et al. (2006) en ont conclu que notre système cognitif associe la hauteur musicale à une représentation spatiale verticale, la représentation horizontale résultant d'une rotation de cette représentation en raison de la disposition du boîtier de réponse (Cho & Proctor, 2003).

Avec des stimuli différents, notre équipe (Lidji et al., 2007) a répliqué ces résultats dans une étude composée de six expériences et réalisée parallèlement à celle de Rusconi et al. (2006). Alors que les notes choisies par l'équipe de Rusconi se succédaient dans la gamme et utilisaient des timbres d'instruments à vent ou à percussion dans la tâche de jugement de timbre mais des sons purs dans la tâche de jugement de hauteur, les notes utilisées dans notre étude étaient plus distantes et jouées au piano et au violon, y compris dans la tâche de jugement de hauteur. En dépit de ces différences méthodologiques, nous avons également observé des réponses plus rapides sur le bouton du bas pour les notes graves et sur le bouton du haut pour les notes aiguës, indépendamment de l'expertise musicale. Lorsque le dispositif de réponse était placé horizontalement, seuls les musiciens présentaient un effet dans la tâche indirecte de jugement de timbre. En bref, nos résultats étaient identiques à ceux de Rusconi et al. (2006). Il nous semblait cependant que cet effet associé à la dimension de hauteur pouvait difficilement être qualifié de musical en raison de la pauvreté des stimuli. C'est pourquoi nous avons intitulé *effet SPARC* (Spatial Pitch Association of Response Codes) l'effet d'association spatiale de codes de réponse pour les hauteurs isolées.

Afin de vérifier si les associations spatiales découvertes pour les hauteurs isolées se généralisent à des stimuli musicaux plus complexes, nous avons appliqué ces mêmes tâches à des intervalles mélodiques ascendants et descendants de deux notes. Nous avons soumis des musiciens et des non musiciens à une tâche de jugement de timbre ou de jugement de direction d'intervalles, toujours avec un dispositif de réponse hori-

zontal ou vertical. Notre hypothèse était que si la représentation verticale des hauteurs musicales était activée automatiquement par tout stimulus musical, deux effets devraient se manifester pour des intervalles mélodiques. Premièrement, une association entre la hauteur des notes composant l'intervalle et les boutons de réponse, les intervalles composés de notes graves conduisant à des réponses plus rapides en bas (ou à gauche) et les intervalles aux notes aiguës menant à des réponses plus rapides en haut (ou à droite). Cet effet constituerait l'expression de l'effet SPARC sur des intervalles mélodiques. Deuxièmement, nous avons prédit un effet de la direction des intervalles (*effet SMARC: Spatial Melodical Association of Response Codes*). En effet, si les intervalles mélodiques activent la ligne mentale observée pour les notes isolées, un intervalle ascendant devrait activer un mouvement du bas vers le haut (ou de la gauche vers la droite) le long de la ligne mentale, et donc mener à des réponses plus rapides en haut (ou à droite), et inversement pour les intervalles descendants.

Ce n'est pourtant pas ce que nous avons observé chez les non musiciens. En effet, en ce qui concerne l'effet SPARC, seuls les musiciens ont associé les intervalles composés de notes graves au bouton du bas (ou de gauche) et ceux composés de notes aiguës au bouton du haut (ou de droite), mais cet effet était loin d'être systématique. De même, l'effet SMARC de direction d'intervalle n'a été observé que chez les musiciens, et uniquement pour le dispositif horizontal. L'expertise musicale semble donc constituer un pré-requis à l'activation de représentations spatiales pour des stimuli musicaux plus complexes que des hauteurs isolées. Cette conclusion peut être mise en perspective avec les résultats exposés précédemment: si la lecture musicale ou la pratique d'un instrument a pour effet de renforcer les traitements spatiaux, comme suggéré par Brochard et al. (2004) et Sluming et al. (2007), il n'est pas surprenant que les associations spatiales pour la hauteur et les intervalles musicaux soient plus robustes chez les musiciens. De manière cohérente, il se pourrait que les individus amusiques ne soient pas en mesure d'activer de telles représentations spatiales des hauteurs musicales.

Cette dernière hypothèse a été testée par Douglas et Bilkey (2007). En complément de l'examen des capacités de rotation mentale des amusiques déjà mentionné, ces auteurs ont investigué la présence d'un effet SPARC et, crucialement, d'interférences entre le traitement de la hauteur et la réalisation de la tâche de rotation mentale chez ces participants. La tâche visant à évaluer la présence d'un effet SPARC dans l'étude de Douglas et Bilkey consistait à demander aux participants de comparer la hauteur des deux notes en indiquant si la deuxième note était plus grave ou plus aiguë qu'une note de référence, présentée initialement (la différence variait de 1 à 5 tons). Le dispositif de réponse pouvait être compatible ou non avec la « ligne mentale verticale ». Bien que les participants amusiques semblent présenter un effet SPARC, avec une performance plus altérée lorsque le dispositif de réponse était incompatible avec la représentations spatiale supposée des hauteurs, cet effet était significativement moins marqué chez eux que chez les participants de contrôle. De plus, en situation de double tâche, la tâche de rotation mentale interférait significativement avec la performance à la tâche de comparaison de hauteur chez les sujets de contrôle mais pas chez les amusiques. Les auteurs ont interprété cet ensemble de données comme indiquant, premièrement, que l'amusie est fortement associée à des déficits de traitement spatial de manière générale, et, deuxièmement, que les individus amusiques présentent un lien plus faible entre les traitements musicaux et spatiaux que les individus non atteints.

Ce travail, bien qu'extrêmement intéressant, mérite d'être discuté sur le plan méthodologique (voir aussi Stewart & Walsh, 2007). Premièrement, le mode de sélection des participants amusiques et le choix de la tâche de rotation mentale utilisée par Douglas et Bilkey (2007) sont contestables. En effet, les participants étaient considérés comme amusiques sur base d'un seul sous-test de la MBEA (Batterie de Montréal d'Evaluation des Amusies, Peretz, Champod, & Hyde, 2003), à savoir le test de contour, qui n'est de surcroît pas le plus représentatif des habiletés de perception musicale. La tâche de rotation employée était une tâche classique (Shepard & Metzler, 1971) en version papier: Douglas et Bilkey ont donc calculé la performance

sur l'ensemble des essais. Il serait souhaitable de répliquer ces observations avec des participants amusiques diagnostiqués avec plus de soin et avec une analyse plus précise des temps de réaction. Plus crucialement, les auteurs ont utilisé une tâche directe de comparaison de notes pour évaluer l'effet d'association spatiale de codes de réponse. De plus, puisque la deuxième note était présentée directement après la note de référence, sans délai temporel, la tâche consistait en réalité à juger le contour mélodique d'un intervalle. Ce choix est surprenant, puisque l'on sait que les amusiques souffrent d'un déficit de discrimination perceptive (Hyde & Peretz, 2004; Peretz & Hyde, 2003) qui les mène à éprouver d'importantes difficultés dans ce type de tâche, du moins pour de petits intervalles (Foxton, Dean, Gee, Peretz, & Griffiths, 2004). La réduction de l'effet SPARC chez les participants amusiques pourrait donc résulter simplement de leur plus faible capacité à réaliser la tâche. Une approche plus appropriée consisterait à évaluer la présence d'associations spatiales pour les hauteurs dans une tâche indirecte, par exemple le jugement de timbre utilisé par Rusconi et al. (2006) ainsi que par notre équipe (Lidji et al., 2007). En effet, la coexistence de traitements explicites déficitaires et de capacités implicites préservées est un phénomène classique en neuropsychologie (e.g., Lê, Raufaste, Roussel, Puel, & Démonet, 2003; Schacter & Buckner, 1998; Vandenberghe, Schmidt, Fery, & Cleeremans, 2006), y compris dans le cas de l'amusie acquise (Tillmann, Peretz, Bigand, & Gosselin, 2007).

En dépit de ces faiblesses, la contribution de Douglas et Bilkey (2007) est certainement importante, car leur étude montre pour la première fois une interférence entre processus spatiaux et traitement des hauteurs musicales chez des individus tout-venant. Cette idée avait déjà été suggérée par Cupchik, Phillips et Hill (2001), qui avaient mis en évidence une corrélation entre la performance à une tâche de rotation mentale et la capacité à effectuer une permutation de notes. Ces travaux sont un premier pas dans la compréhension des interactions entre musique et espace. Il reste cependant du chemin à parcourir pour comprendre l'origine cognitive et neuronale de ces interactions.

IMPLICATIONS THÉORIQUES DES INTERACTIONS ENTRE MUSIQUE ET ESPACE

Les données issues de l'étude de musiciens et d'enfants en cours d'apprentissage de la musique ainsi que la découverte d'associations spatiales pour les hauteurs musicales convergent vers l'existence de liens étroits entre traitements spatiaux et musicaux. Dans un modèle novateur, intitulé *ATOM* (A Theory of Magnitude), Walsh (2003) a suggéré une explication à ces liens: le traitement des informations spatiales, numériques (Fias & Fischer, 2005; Hubbard et al., 2005) et temporelles (Vallesi, Binns, & Shallice, 2008) reposerait sur un système généralisé d'évaluation de la magnitude ayant son siège dans le cortex pariétal. Sur la base des travaux décrits ci-dessus, il semble plausible que le traitement des hauteurs musicales (Cohen Kadosh et al., 2008; Lidji et al., 2007; Rusconi et al., 2006; Stevens et al., 1937) fasse appel à ce même système.

Nos observations d'un effet SPARC et la description récente d'effets d'associations spatiales de codes de réponse pour des intervalles temporels (Vallesi et al., 2008) répondent, en effet, à une des prédictions émises par Walsh (2003), selon laquelle l'effet SNARC (numérique) devrait en réalité correspondre à un phénomène plus général, *l'effet SQUARC* (Spatial QUantity Association of Response Codes). L'idée d'un réseau neuronal et fonctionnel partagé pour les différents stimuli activant la notion de magnitude apporte également un éclairage nouveau sur les liens entre pratique ou compétences musicales et traitements visuo-spatio-numériques. Le modèle de Walsh permettrait d'expliquer la corrélation entre performances spatiales et musicales chez les musiciens (Brochard et al., 2004; Costa-Giomi, 2004; Sluming et al., 2007) ainsi que la corrélation négative constatée chez les amusiques (Douglas & Bilkey, 2007), puisque ces traitements feraient appel à un système commun. Une approche intéressante pour tester cette hypothèse de manière plus approfondie consisterait à examiner les interactions entre les traitements temporels, musicaux et spatiaux chez les musiciens.

Si le modèle *ATOM* justifie de manière apparemment séduisante

et économique les liens documentés entre musique et espace, la magnitude n'est qu'une des relations possibles entre hauteurs musicales et chiffres. Une hypothèse alternative est que l'aspect séquentiel de ces stimuli soit à l'origine de la similarité observée. En effet, les hauteurs discrètes utilisées dans les tâches ayant mis en évidence un effet SPARC (Lidji et al., 2007, Rusconi et al., 2006) présentent un caractère ordinal (correspondant à la séquence des notes). Or, des séquences ordonnées difficiles à concevoir en termes de magnitude, telle que la séquence des lettres de l'alphabet, des mois de l'année (Gevers, Reynvoet, & Fias, 2003) et des jours de la semaine (Gevers, Reynvoet, & Fias, 2004), provoquent également des effets d'association spatiale de codes de réponse. Par conséquent, les effets SPARC pourraient tout aussi bien être liés au caractère ordonné des hauteurs musicales qu'à l'activation d'une représentation abstraite de la magnitude.

Les nombres, eux aussi, présentent un caractère séquentiel qui pourrait être responsable de l'effet SNARC sans faire appel à un système abstrait de représentation de la magnitude. Cependant, de nombreuses données issues de méthodes différentes, qu'il s'agisse d'imagerie cérébrale (voir par exemple Göbel, Walsh, & Rushworth, 2001; Hubbard et al., 2005; Sandrini et al., 2004; Suchan et al., 2002) ou de l'étude de patients présentant des troubles du traitement spatial (Bachot, Gevers, Fias, & Roeyers, 2005; Rossetti et al., 2004; Zorzi et al., 2002) permettent de conclure que le traitement des nombres active bien des représentations spatiales.

Par contraste, les données soutenant la mise en œuvre de traitements spatiaux lors d'activités musicales sont encore fragmentaires. Des recherches équivalentes à celles effectuées sur l'effet SNARC seront nécessaires pour améliorer notre compréhension des associations spatiales pour les hauteurs musicales. Il faudrait, par exemple, varier le type de tâche utilisée et le mode de réponse (manuel ou visuel) afin de dissocier la contribution de composantes motrices et celles de composantes cognitives dans l'effet, comme cela a été fait en cognition numérique (Fischer, Castel, Dodd, & Pratt, 2003; Fischer, Warlop, Hill, & Fias, 2004; Müller

& Schwarz, 2007; Schwarz & Keus, 2004). Il serait également judicieux d'explorer les aires cérébrales activées par les tâches générant l'effet SPARC et de les comparer à celles impliquées dans des traitements spatiaux. Si une étude d'IRMf (Schmithorst & Holland, 2003) semble indiquer que le cortex pariétal, centre des traitements spatiaux, est impliqué dans le traitement des hauteurs musicales, l'utilisation de la stimulation magnétique transcrânienne (Göbel, Walsh, & Rushworth, 2001; Göbel, Calabria, Farnè, & Rossetti, 2006) permettrait d'investiguer plus directement le rôle des aires pariétales dans la comparaison de notes. Enfin, il serait extrêmement intéressant d'observer les conséquences de déficits acquis (hémiparésie) ou de troubles du développement du traitement spatial sur la ligne mentale musicale (Stewart & Walsh, 2007). Ces travaux constitueraient un pendant important de ceux de Douglas et Bilkey (2007) sur les effets de l'amusie sur les traitements spatiaux.

Remerciements

Ce travail a été réalisé grâce au soutien du Fonds National de la Recherche Scientifique-FNRS (projet FRFC 2.4633.06, *Mental representations of music and language in singing and nature of their interactions*). Pascale Lidji a bénéficié d'une subvention Mini-Arc de l'Université libre de Bruxelles (AT.20051024.CG.1, *Représentations mentales de la musique et du langage dans le chant et nature de leurs interactions*) et Régine Kolinsky est Maître de Recherche du Fonds de la Recherche scientifique – FNRS, Belgique. Nous remercions José Morais pour les discussions stimulantes sur la question évoquée dans cet article, ainsi que pour une lecture critique de celui-ci.

ABSTRACT

Musical Pitch and Space

In this paper, we summarize the present knowledge on the interactions between music and space. After reviewing the literature on the effects of music listening and practice on visuo-spatial abilities, we discuss recent data suggesting that musical pitch activates spatial associations (SPARC and SMARC effects). The theoretical implication of these two data sets is that music, like other dimensions activating magnitude, could trigger neuronal networks involved in spatial processing.

RÉFÉRENCES

- Andersen, R. A., Snyder, L. H., Bradley, D. C., & Xing, J. (1997). Multimodal representations of space in the posterior parietal cortex and its use in planning movements. *Annual Review of Neurosciences*, *20*, 303-330.
- Anvari, S., Trainor, L. J., Woodside, J., & Levy, B. A. (2002). Relations among musical skills, phonological processing, and early reading ability in preschool children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *83*, 111-130.
- Ayotte, J., Peretz, I., & Hyde, K. (2002). Congenital amusia - A group study of adults afflicted with a music-specific disorder. *Brain*, *125*, 238-251.
- Bachot, J., Gevers, W., Fias, W., & Roeyers, H. (2005). Number sense in children with visuospatial disabilities: Orientation of the mental number line. *Psychology Science*, *47*, 172-183.
- Bangerter, A., & Heath, C. (2004). The Mozart effect: Tracking the evolution of a scientific legend. *British Journal of Social Psychology*, *43*, 605-623.
- Beck, J., & Shaw, W. A. (1961). The scaling of pitch by the method of magnitude estimation. *American Journal of Psychology*, *74*, 242-251.
- Besson, M., Schön, D., Moreno, S., Santos, A., & Magne, C. (2007). Influence of musical expertise and musical training on pitch processing in music and language. *Restorative Neurology and Neuroscience*, *25*(3-4), 399-410.
- Brochard, R., Dufour, A., & Despres, O. (2004). Effect of musical expertise on visuospatial abilities: Evidence from reaction times and mental imagery. *Brain and Cognition*, *54*, 103-109.
- Brysbart, M. (1995). Arabic number reading: on the nature of the numerical scale and the origin of phonological recoding. *Journal of Experimental Psychology: General*, *124*(4), 434-452.
- Burns, E. M., & Ward, W. D. (1982). Intervals, scales, and tuning. In D. Deutsch (Ed.), *The Psychology of Music* (Vol. 241-269). New York: Academic press.
- Cheek, J. M., & Smith, L. R. (1999). Music training and mathematics achievement. *Adolescence*, *34*, 759-761.
- Cho, Y. S., & Proctor, R. W. (2003). Stimulus and response representations underlying orthogonal stimulus-response compatibility effects. *Psychonomic Bulletin and Review*, *10*, 45-73.

- Cohen Kadosh, R., Brodsky, W., Levin, M., & Henik, A. (2008). Mental representation: What can pitch tell us about the distance effect. *Cortex*, *44*, 470-477.
- Colby, C. L., & Goldberg, M. E. (1999). Space and attention in parietal cortex. *Annual Review of Neurosciences*, *22*, 319-349.
- Costa-Giomi, E. (1999). The effects of three years of piano instruction on children's cognitive development. *Journal of Research in Music Education*, *47*(3), 198-212.
- Costa-Giomi, E. (2004). *Effects of starting age of music lessons on spatial performance*. Paper presented at the 8th International Conference on Music Perception and Cognition, Evanston, IL.
- Cupchik, G. C., Phillips, K., & Hill, D. S. (2001). Shared processes in spatial rotation and musical permutation. *Brain and Cognition*, *46*, 373-382.
- Dehaene, S. (2001). Precise of the number sense. *Mind and Language*, *16*, 16-36.
- Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General*, *122*, 371-396
- Douglas, K. M., & Bilkey, D. K. (2007). Amusia is associated with deficits in spatial processing. *Nature Neuroscience*, *10*, 915-921.
- Eitan, Z., & Timmers, R. (2006). *Beethoven's last piano sonata and those who follow crocodiles: Cross-domain mapping of auditory pitch in a musical context*. Paper presented at the 9th International Conference on Music Perception and Cognition, Bologna.
- Fias, W. (2001). Two routes for the processing of verbal numbers: Evidence from the SNARC effect. *Psychological Research*, *65*, 250-259.
- Fias, W., Brysbaert, M., Geypens, F., & d'Ydewalle, G. (1996). The importance of magnitude information in numerical processing: Evidence from the SNARC effect. *Mathematical Cognition*, *2*, 95-110.
- Fias, W., & Fischer, M. H. (2005). Spatial representation of numbers. In J. I. D. Campbell (Ed.), *Handbook of mathematical cognition* (pp. 43-54). New York: Psychology Press.
- Fias, W., Lauwereyns, J., & Lammertyn, J. (2001). Irrelevant digits affect feature-based attention depending on the overlap of neural circuits. *Cognitive Brain Research*, *12*, 415-423.
- Fischer, M. H., Castel, A. D., Dodd, M. D., & Pratt, J. (2003). Perceiving numbers causes spatial shifts of attention. *Nature Neuroscience*, *6*, 555-556.
- Fischer, M. H., Warlop, N., Hill, R. L., & Fias, W. (2004). Oculomotor bias induced by

- number perception. *Experimental Psychology*, 51, 91-97.
- Foxton, J. M., Dean, J. L., Gee, R., Peretz, I., & Griffiths, T. D. (2004). Characterization of deficits in pitch perception underlying “tone-deafness”. *Brain*, 127, 801-810.
- Gardiner, M. F., Fox, A., Knowles, F., & Jeffrey, D. (1996). Learning improved by arts training. *Nature*, 381, 284.
- Gevers, W., Lammertyn, J., Notebaert, W., Verguts, T., & Fias, W. (2006). Automatic response activation of implicit spatial information: Evidence from the SNARC effect. *Acta Psychologica*, 122, 221-233.
- Gevers, W., Reynvoet, B., & Fias, W. (2003). The mental representation of ordinal sequences is spatially organized. *Cognition*, 87, B87-95.
- Gevers, W., Reynvoet, B., & Fias, W. (2004). The mental representation of ordinal sequences is spatially organized: Evidence from days of the week. *Cortex*, 40, 171-172.
- Göbel, S., Walsh, V., & Rurshworth, M. F. S. (2001). The mental number line and the human angular gyrus. *Neuroimage*, 14, 1278-1289.
- Göbel, S. M., Calabria, M., Farnè, A., & Rossetti, Y. (2006). Parietal rTMS distorts the mental number line: Simulating ‘spatial’ neglect in healthy subjects. *Neuropsychologia*, 44, 860-868.
- Graziano, A. B., Peterson, M., & Shaw, G. L. (1999). Enhanced learning of proportional math through music training and spatial-temporal reasoning. *Neurological Research*, 21, 139-152.
- Ho, C., Mason, O., & Spence, C. (2007). An investigation into the temporal dimension of the Mozart effect: Evidence from the attentional blink task. *Acta Psychologica*, 125, 117-128.
- Ho, Y., Cheung, M., & Chan, A. S. (2003). Music training improves verbal but not visual memory: Cross-sectional and longitudinal explorations in children. *Neuropsychology*, 17, 439-450.
- Hubbard, E. M., Piazza, M., Pinel, P., & Dehaene, S. (2005). Interactions between number and space in parietal cortex. *Nature Reviews Neuroscience*, 6, 435-447.
- Husain, G., Thompson, W. F., & Schellenberg, E. G. (2002). Effects of musical tempo and mode on arousal, mood, and spatial abilities. *Music Perception*, 20, 149-169.
- Hyde, K. L., & Peretz, I. (2004). Brains that are out of tune but in time. *Psychological Science*, 15, 356-360.
- Ito, Y., & Hatta, T. (2004). Spatial structure of quantitative representation of numbers: ev-

- idence from the SNARC effect. *Memory & Cognition*, 32, 662-673.
- Johnson, J. K., Shaw, G. L., Vuong, M., Vuong, S., & Cotman, C. W. (2002). Short-term improvement on a visual-spatial task after music listening in Alzheimer's disease: A group study. *Activities, Adaptation and Aging*, 26, 37-50.
- Lahiri, N., & Duncan, J. S. (2007). The Mozart effect: Encore. *Epilepsy & Behavior*, 11, 152-153.
- Lê, S., Raufaste, E., Roussel, S., Puel, M., & Démonet, J. F. (2003). Implicit face perception in a patient with visual agnosia? Evidence from behavioural and eye-tracking analyses. *Neuropsychologia*, 41, 702-712.
- Lidji, P., Kolinsky, R., Lochy, A., & Morais, J. (2007). Spatial associations for musical stimuli: A piano in the head? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33, 1189-1207.
- McDonald, C., & Stewart, L. (2008). Uses and function of music in congenital amusia. *Music Perception*, 25, 345-355.
- McKelvie, P., & Low, J. (2002). Listening to Mozart does not improve children's spatial ability: Final curtains for the Mozart effect. *British Journal of Developmental Psychology*, 20, 241-258.
- Moyer, R. S., & Landauer, T. K. (1967). Time required for judgment of numerical inequality. *Nature*, 215, 1519-1520.
- Müller, D., & Schwarz, W. (2007). Is there an internal association of numbers to hands? The task set influences the nature of the SNARC effect. *Memory and Cognition*, 35, 1151-1161.
- Nantais, K. M., & Schellenberg, E. G. (1999). The Mozart effect: An artifact of preference. *Psychological Science*, 10, 370-373.
- Nuerk, H. C., Wood, G., & Willmes, K. (2005). The universal SNARC effect: the association between number magnitude and space is amodal. *Experimental Psychology*, 52, 187-194.
- Parkman, J. M. (1971). Temporal aspects of digit and letter inequality judgments. *Journal of experimental Psychology*, 91, 191-205.
- Peretz, I. (2001). Brain specialization for music: New evidence from congenital amusia. In *The Biological Foundations of Music* (Vol. 930, pp. 153-165). New York: New York Academy of Science.
- Peretz, I., Ayotte, J., Zatorre, R. J., Mehler, J., Ahad, P., Penhune, V. B., & Jutras, B. (2002). Congenital amusia: A disorder of fine-grained pitch discrimination. *Neuron*, 33, 185-191.

- Peretz, I., Champod, A. S., & Hyde, K. (2003). Varieties of musical disorders - The Montreal Battery of Evaluation of Amusia. *Neurosciences and Music*, 999, 58-75.
- Peretz, I., Gosselin, N., Tillmann, B., Cuddy, L. L., Gagnon, B., Trimmer, C., Paquette, S., & Bouchard, B. (2008). On-line identification of congenital amusia. *Music Perception*, 24, 331-343.
- Peretz, I., & Hyde, K. L. (2003). What is specific to music processing? Insights from congenital amusia. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 362-367.
- Rauscher, F. H., & Hinton, S. (2006). The Mozart effect: Music listening is not music instruction. *Educational Psychologist*, 41, 233-238.
- Rauscher, F. H., Robinson, K. D., & Jens, J. J. (1998). Improved maze learning through early music exposure in rats. *Neurological Research*, 20, 427-432.
- Rauscher, F. H., Shaw, G. L., & Ky, K. N. (1995). Listening to Mozart enhances spatial-temporal reasoning: towards a neurophysiological basis. *Neuroscience Letters*, 185, 44-47.
- Rauscher, F. H., & Zupan, M. A. (2000). Classroom keyboard instruction improves kindergarten children's spatial-temporal task performance: a field experiment. *Early Childhood Research Question*, 15, 215-218.
- Reynvoet, B., Brisbaert, M., & Fias, W. (2002). Semantic priming in number naming. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 55A, 1127-1139.
- Rossetti, Y., Jacquin-Courtois, S., Rode, G., Ota, H., Michel, C., & Boisson, D. (2004). Does action make the link between number and space representation? Visuo-manual adaptation improves number bisection in unilateral neglect. *Psychological Science*, 15, 426-430.
- Rusconi, E., Kwan, B., Giordano, B. L., Umiltà, C., & Butterworth, B. (2006). Spatial representation of pitch height: the SMARC effect. *Cognition*, 99(2), 113-129.
- Sandrini, M., Rossini, P., & Miniussi, C. (2004). The differential involvement of inferior parietal lobule in number comparison: A rTMS study. *Neuropsychologia*, 42, 1902-1909.
- Sarnthein, J., vonStein, A., Rappelsberger, P., Petsche, H., Rauscher, F. H., & Shaw, G. L. (1997). Persistent patterns of brain activity: an EEG coherence study of the positive effect of music on spatial-temporal reasoning. *Neurological Research*, 19, 107-116.
- Schacter, D. L., & Buckner, R. L. (1998). Priming and the brain. *Neuron*, 20, 185-195.
- Schellenberg, E. G. (2004). Music lessons enhance IQ. *Psychological Science*, 15, 511-514.

- Schellenberg, E. G. (2006a). Exposure to music: The truth about the consequences. In O. U. Press (Ed.), *The child as a musician: A handbook of musical development* (pp. 111-134). Oxford.
- Schellenberg, E. G. (2006b). Long-term positive association between music lessons and IQ. *Journal of Educational Psychology*, *92*, 457-468.
- Schellenberg, E. G., & Hallam, S. (2005). Music listening and cognitive abilities in 10 and 11 year olds: The Blur effect. In *Annals of the New-York Academy of Science* (Vol. 1060, pp. 202-209).
- Schellenberg, E. G., Nakata, T., Hunter, P. G., & Tamoto, S. (2007). Exposure to music and cognitive performance: Tests of children and adults. *Psychology of Music*, *35*, 5-19.
- Schellenberg, E. G. M. a. n. a. I. Z. P. E., The Biological Foundations of Music. New York : The New York Academy of Sciences, 355-371. (2001). Music and nonmusical abilities. In R. J. Zatorre & I. Peretz (Eds.), *The Biological Foundations of Music* (pp. 355-371). New York: The New York Academy of Science.
- Schmithorst, V. J., & Holland, S. K. (2003). The effect of musical training on music processing: A functional magnetic resonance imaging study in humans. *Neuroscience Letters*, *348*, 65-68.
- Schwarz, W., & Keus, I. M. (2004). Moving the eyes along the mental number line: comparing SNARC effects with saccadic and manual responses. *Perception and Psychophysics*, *66*, 651-664.
- Shepard, R. N. (1982). Geometrical approximations to the structure of musical pitch. *Psychological Review*, *89*, 305-333.
- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, *171*, 701-730.
- Sluming, V., Brooks, J., Howard, M., Downes, J. J., & Roberts, N. (2007). Broca's area supports enhanced visuospatial cognition in orchestral musicians. *Journal of Neuroscience*, *27*, 3799-3806.
- Steele, K. M. (2005/2006). Do music lessons enhance IQ? A reanalysis of Schellenberg (2004). *Scientific Review of Mental Health Practice*, *4*, 6-9.
- Steele, K. M. (2006). Unconvincing evidence that rats show a Mozart effect. *Music Perception*, *23*, 455-458.
- Steele, K. M., Bass, K. E., & Crook, M. D. (1999). The mystery of the Mozart effect : Failure to replicate. *Psychological Science*, *10*, 366-369.
- Stevens, S. S., Volkman, J., & Newman, E. B. (1937). A scale for the measurement of the

- psychological magnitude of pitch. *Journal of the Acoustical Society of America*, 8, 185-190.
- Stewart, L., & Walsh, V. (2007). Music perception: Sounds lost in space. *Current Biology*, 17, R892-R893.
- Suchan, B., Yaquez, L., Wunderlich, G., Canavan, A. G., Herzog, H., Tellmann, L., Hömberg, V., & Seitz, R. (2002). Neural correlates of visuospatial imagery. *Behavioural Brain Research*, 131, 163-168.
- Thompson, W. F., Schellenberg, E. G., & Husain, G. (2001). Mood, arousal and the Mozart effect. *Psychological Science*, 12, 248-251.
- Thompson, W. F., Schellenberg, E. G., & Husain, G. (2004). Decoding speech prosody: Do music lessons help? *Emotion*, 4, 46-64.
- Thorndike, R. L., Hagen, E. P., & Sattler, J. M. (1986). *The Stanford-Binet Scale of Intelligence*. Chicago: Riverside.
- Tillmann, B., Peretz, I., Bigand, E., & Gosselin, N. (2007). Harmonic priming in an amusic patient: The power of implicit tasks. *Cognitive Neuropsychology*, 24, 603-622.
- Vallesi, A., Binns, M., & Shallice, T. (2008). An effect of spatial-temporal association of response codes: Understanding the cognitive representation of time. *Cognition*, 107, 501-527.
- Vandenberghe, M., Schmidt, N., Fery, P., & Cleeremans, A. (2006). Can amnesic patients learn without awareness? New evidence comparing deterministic and probabilistic sequence learning. *Neuropsychologia*, 44, 1629-1641.
- Walsh, V. (2003). A theory of magnitude: common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 483-488.
- Zorzi, M., Priftis, K., & Umiltà, C. (2002). Neglect disrupts the mental number line. *Nature*, 417, 138-139.