

## **Musique, syntaxe et sémantique : des ressources d'intégration structurale et temporelle partagées ?**

*Lisianne Hoch<sup>1</sup>, Barbara Tillmann<sup>1</sup> & Bénédicte Poulin-  
Charronnat<sup>2</sup>*

(1) Université Claude Bernard, Lyon 1, Université de Lyon, NSCC, CNRS-UMR  
5020 & IFR 19, Lyon, France

(2) Université de Bourgogne, LEAD, CNRS-UMR 5022, Dijon, France

### **Résumé**

La dépendance ou l'indépendance des traitements de la musique et du langage ont fait l'objet de nombreuses études comportementales, neurophysiologiques et neuropsychologiques. Alors que certaines de ces études suggèrent des processus de traitement indépendants, d'autres ont montré des corrélats neuronaux communs et des interactions entre les traitements de la musique et du langage. Patel (2003) propose que les processus d'intégration syntaxique en musique et en langage partagent des ressources communes ("Shared Syntactic Integration Resource Hypothesis", SSIRH). Cette hypothèse a donné lieu à des recherches qui suggèrent une interaction plus forte entre les traitements de la syntaxe musicale et linguistique qu'entre les traitements de la syntaxe musicale et de la sémantique en langage. Se basant sur une analyse détaillée de ces études, la présente revue tente de réconcilier l'ensemble des données exposées en proposant que le traitement de la musique, de la syntaxe et de la sémantique partagent des processus généraux d'intégration structurale et temporelle.

---

**Correspondance** : Lisianne Hoch, Université Claude Bernard - Lyon I CNRS UMR 5020 . Neurosciences Sensorielles, Comportement, Cognition. 50 Av. Tony Garnier. F-69366 Lyon Cedex 07.

Lisianne.Hoch@olfac.univ-lyon1.fr. Tel : +33 (0) 4 37 28 74 90

**Mots-clés:** musique, syntaxe, sémantique, intégration structurale, intégration temporelle

**Key words :** music, syntax, semantics, structural integration, temporal integration

## **1- INTRODUCTION : DÉBAT SUR LA MODULARITÉ DES TRAITEMENTS DE LA MUSIQUE ET DU LANGAGE.**

La musique et le langage sont des systèmes complexes caractérisés par plusieurs dimensions d'organisation, dont certaines sont comparables (Besson et Schön, 2003 ; Patel, 2008). Par exemple, la musique (e.g., tonale occidentale) et le langage sont des systèmes hiérarchiques, structurés par un ensemble de règles syntaxiques (Jackendoff, 2002 ; Lerdahl, 2001 ; Lerdahl & Jackendoff, 1983 ; Patel, 2008). Ces règles permettent de combiner des événements musicaux ou linguistiques de base (notes, phonèmes) en unités plus complexes (accords, mots) pour ensuite former des phrases (musicales, linguistiques). En musique, la fonction tonale d'un événement musical (note, accord) est soumise à une dépendance contextuelle (i.e., la tonalité installée par le contexte) : un accord de Do Majeur dans un contexte de Do Majeur constitue un accord de tonique (i.e., accord le plus stable). Le même accord dans un contexte de Sol Majeur constitue un accord de sous-dominante (i.e., 3ème accord le plus stable après l'accord de dominante) et dans un contexte de Ré Majeur un accord hors-tonalité (i.e., constituant une forte violation de la syntaxe musicale). Lors de l'écoute, les connaissances musicales implicites de l'auditeur guident la percep-

tion musicale via le développement d'attentes musicales (Tillmann, 2005). En langage, les connaissances syntaxiques et sémantiques permettent également le développement d'attentes qui guident la compréhension. Le traitement de la syntaxe musicale ou linguistique et le traitement sémantique peuvent être étudiés avec des tâches explicites comme un jugement de cohérence ou des tâches implicites comme un jugement de consonance dans le paradigme d'amorçage (Bigand & Pineau, 1997 ; McNamara, 2005).

Les similarités structurelles existantes entre la musique et le langage ont motivé un ensemble de recherches visant à spécifier les relations entre le traitement des structures musicales et linguistiques, et leurs corrélats neuronaux. L'observation de corrélats spécifiques au traitement de la musique ou du langage soutient la thèse d'une organisation cérébrale modulaire (Fodor, 1983 ; Peretz & Coltheart, 2003), alors que la mise en évidence de processus partagés l'affaiblit. Malgré un nombre croissant d'études sur ce thème, le débat sur la modularité des processus de traitement du langage et de la musique reste une question ouverte. Certaines études comportementales, neurophysiologiques et neuropsychologiques suggèrent des processus indépendants (e.g., Basso & Capitani, 1985 ; Besson, Faïta, Peretz, Bonnel, & Requin, 1998 ; Bonnel, Faïta, Peretz, & Besson, 2001 ; Peretz, Belleville, & Fontaine, 1997 ; Peretz, Kolinsky, Tramo, Labrecque, Hublet, et al., 1994). En neuropsychologie, l'observation de cas d'amusie sans aphasie (i.e., patients présentant un déficit du traitement musical sans déficit du langage, Peretz, et al., 1997; Peretz et al., 1994) et de cas d'aphasie sans amusie (i.e., patients présentant un déficit de la perception et/ou de la production du langage sans déficit du traitement musical, Basso & Capitani, 1985) révèle une double dissociation fonctionnelle

---

<sup>1</sup> Pour éviter toute confusion, dans cet article, « traitement musical » sera synonyme de traitement de la syntaxe musicale, et « traitement syntaxique » ou « traitement sémantique » référeront aux traitements de la syntaxe et de la sémantique en langage uniquement.

entre le traitement de la musique et du langage et constitue un argument fort en faveur d'une organisation modulaire (Peretz & Coltheart, 2003). En contrepartie, d'autres études ont suggéré des corrélats neurophysiologiques communs ainsi que des interactions entre la musique et le langage (Patel, 2008 ; sections 2 et 4 de la présente revue). Par exemple, des études comportementales ont suggéré des processus dépendants, notamment en montrant que la fonction tonale d'un accord influence l'identification de syllabes chantées (Bigand, Tillmann, Poulin, D'Adamo, & Madurell, 2001), parlées (Hoch & Tillmann, soumis) et présentées visuellement (Escoffier & Tillmann, 2008).

Les relations entre les traitements musical et linguistique notamment aux niveaux syntaxique et sémantique ont fait l'objet de plusieurs études qui ont conduit à l'observation de patrons d'interactions différents pour la syntaxe et la sémantique. Après une revue de ces études, nous tenterons de réconcilier l'ensemble des données observées en proposant que les traitements musical, syntaxique et sémantique partagent des ressources d'intégration structurale et temporelle.

## **2- PREMIÈRES ÉTUDES COMPARATIVES SUR LES CORRÉLATS COGNITIFS ET NEURONAUX DU TRAITEMENT DU LANGAGE ET DE LA MUSIQUE.**

En langage, de nombreuses études électrophysiologiques ont montré que le traitement d'une violation syntaxique évoquait une onde antérieure négative précoce latéralisée à gauche (i.e., (E)LAN, autour de 200 ms) suivie d'une composante positive tardive, l'onde P600 (Friederici, Pfeifer, & Hahne, 1993 ; Hagoort, Brown, & Groothusen, 1993 ; Kutas & Hillyard, 1983 ; Osterhout & Holcomb, 1992). Afin d'étudier la spécificité linguistique de l'onde P600, Patel, Gibson, Ratner, Besson et Hol-

comb (1998) ont comparé les corrélats électrophysiologiques évoqués par des violations syntaxiques et musicales chez les mêmes participants. Pour le langage, les phrases étaient syntaxiquement correctes, complexes (i.e., difficiles à intégrer) ou incorrectes (i.e., impossibles à intégrer). Pour la musique, les séquences d'accords contenaient un accord cible correspondant soit à la tonique (i.e., fortement attendu et donc facile à intégrer), soit à un accord harmoniquement distant (i.e., difficile à intégrer) ou éloigné (i.e., impossible à intégrer) sur le cercle des quintes<sup>2</sup>. Les deux types de violations, syntaxiques et musicales, évoquaient une onde P600. Les deux ondes P600 étaient indifférenciables aussi bien temporellement que sur la base de leur topographie et de leurs sources, suggérant que l'onde P600 n'est pas spécifique au traitement du langage. Dans cette étude, la violation musicale évoquait aussi une onde antéro-temporale négative à droite (i.e., RATN, entre 300 et 400 ms). Les auteurs ont suggéré que l'onde RATN correspondait à un composant plus tardif de la (E)LAN. D'autres études en musique ont observé une onde similaire à la (E)LAN en langage, excepté sa latéralisation hémisphérique à droite : l'onde ERAN (i.e., onde antérieure négative précoce latéralisée à droite, autour de 200 ms) reflèterait le traitement d'une violation musicale (i.e., accord de sixte napolitaine, Koelsch, Gunter, Friederici, & Schröger, 2000 ; Koelsch & Mulder, 2002).

Ces études suggèrent des corrélats électrophysiologiques communs au traitement de la syntaxe en musique et en langage. Par ailleurs, plusieurs études d'imagerie cérébrale sur la perception musicale ont montré que l'aire de Broca et son homologue à droite (plus précisément le gyrus frontal inférieur et l'opercule frontal droit) connus pour être impliqués dans le traitement du langage, étaient aussi impliqués dans le traitement musical (Koelsch, Gunter, von Cramon, Zysset, Lohmann, et al., 2002 ; Maess, Koelsch, Gunter, & Friederici, 2001 ; Tillmann, Janata, &

---

<sup>2</sup> Le cercle des quintes est une représentation théorique circulaire des tonalités et de leurs accords de tonique. Le nombre de pas séparant deux tonalités sur le cercle définit leur distance harmonique.

Bharucha, 2003 ; Tillmann, Koelsch, Escoffier, Bigand, Lalitte, et al., 2006).

À la différence de la comparaison des traitements syntaxiques en langage et en musique, une autre étude électrophysiologique s'intéressait aux relations entre les traitements sémantique et musical dans le chant (Besson et al., 1998). Cette étude utilisait des extraits d'opéra français, dans lesquels la cohérence sémantique du dernier mot avec le contexte de la phrase (e.g., « Les étoffes flottaient au vent vs. sang ») et la cohérence musicale de la dernière note (i.e., note tonique (événement attendu) vs. note appartenant à une autre tonalité (événement inattendu)) étaient manipulées. Pour chaque extrait, les participants devaient juger la cohérence sémantique du dernier mot et la cohérence musicale de la note sur laquelle le dernier mot était chanté. La violation sémantique évoquait une onde négative autour de 400 ms (i.e., N400 ; Friederici et al., 1993 ; Kutas & Hillyard, 1980, 1983 ; Osterhout & Holcomb, 1992) et la violation musicale une composante positive tardive autour de 800 ms (relativement similaire à l'onde P600). Quand les extraits d'opéra se terminaient par une double incohérence (i.e., sémantique et musicale), les auteurs observaient une additivité des marqueurs électrophysiologiques des traitements sémantique et musical (i.e., une onde N400 suivie par une onde P600). Ce résultat a été interprété en termes de traitements indépendants pour la sémantique et la musique. Une étude comportementale utilisant le même matériel (Bonnell et al. 2001) aboutissait à la même interprétation d'indépendance en montrant qu'en situation de double tâche (i.e., jugement de cohérence sémantique et musicale), les performances n'étaient pas altérées par rapport à la situation de simple tâche (i.e., jugement de cohérence sémantique ou musicale). L'ensemble des études présentées dans cette section suggère que si les traitements musicaux et linguistiques impliquent des processus communs, ceux-ci pourraient alors être spécifiques au traitement syntaxique.

### **3- SSIRH : L'HYPOTHÈSE DE RESSOURCES D'INTÉGRATION SYNTAXIQUE PARTAGÉES POUR LA MUSIQUE ET LE LANGAGE.**

L'ensemble des études citées dans la section 2 a conduit Patel (2003) à formuler une hypothèse selon laquelle le traitement de la musique et du langage partagerait des ressources d'intégration syntaxique (i.e., Shared Syntactic Integration Resources Hypothesis, SSIRH). La SSIRH repose sur la théorie des dépendances syntaxiques locales en langage (i.e., Syntactic Dependency Locality Theory, Gibson, 1998) et sur la théorie de l'espace tonal de Lerdahl (i.e., Tonal Pitch Space Theory, 2001) qui soulignent l'existence de similarités entre le traitement de la musique et du langage. La SSIRH propose que la musique et le langage partagent des ressources impliquées dans les processus d'intégration structurale des événements (musicaux ou linguistiques) et des processus de mémoire de travail. Ces ressources permettraient de relier les événements d'une séquence musicale ou d'une phrase entre eux pour interpréter la séquence ou la phrase. En revanche, la musique et le langage disposeraient de réseaux neuronaux distincts pour le stockage des représentations musicales et linguistiques à long terme, autorisant ainsi des déficits sélectifs du traitement de la musique (i.e., amusie) et du langage (i.e., aphasie). Partant du postulat que les ressources d'intégration structurale nécessaires aux traitements syntaxiques en musique et en langage sont limitées, la SSIRH prédit des effets d'interférence entre les traitements simultanés de la syntaxe musicale et linguistique. La SSIRH prédit également un déficit syntaxique partagé pour le langage et la musique chez les patients aphasiques. Malgré des données suggérant une indépendance des traitements musical et sémantique (Besson et al., 1998 ; Bonnel et al., 2001), la SSIRH focalise sur le traitement de la syntaxe et ne fait aucune prédiction directe quant aux relations entre les traitements de la musique et de la sémantique.

La SSIRH a motivé plusieurs recherches comportementales et électrophysiologiques présentant simultanément les informations musicales et linguistiques afin d'étudier leur interaction aux niveaux syntaxique et sémantique, ainsi qu'une étude neuropsychologique qui a comparé les capacités de traitement musical, syntaxique et sémantique chez des patients aphasiques (section 4). L'implication des résultats issus de ces études est discutée dans les sections 5 et 6.

#### **4- INTERACTIONS DU TRAITEMENT MUSICAL AVEC LES TRAITEMENTS SYNTAXIQUE ET SÉMANTIQUE EN LANGAGE.**

##### **4.1. Études comportementales.**

Afin d'étudier les interactions entre les traitements musical et sémantique, Poulin-Charronnat, Bigand, Madurell et Peereman (2005) présentaient simultanément l'information musicale et l'information linguistique en utilisant des phrases chantées. Les participants devaient effectuer une tâche de décision lexicale sur le dernier élément de la phrase (i.e., est-ce un mot de la langue française ou non) qui était sémantiquement relié ou non relié au contexte de la phrase (e.g., la girafe a un très long cou vs. pied), et chanté sur un accord de tonique (i.e., attendu) ou sur un accord de sous-dominante (i.e., moins attendu). La fonction tonale de l'accord sur lequel était chanté le dernier mot modulait le traitement sémantique : l'amorçage sémantique (i.e., facilitation de traitement d'un mot sémantiquement relié comparé à un mot sémantiquement non relié) était plus fort quand le dernier mot était chanté sur un accord attendu par rapport à un accord moins attendu. Ce résultat, contraire à celui de Besson et al. (1998 ; voir section 5.1 pour une discussion) suggère des processus communs pour les traitements musical et sémantique.

Dans le chant, l'information musicale et l'information linguistique sont intégrées dans un même signal acoustique. Cette intégration pourrait favoriser l'émergence d'une interaction entre les traitements musical et

sémantique. Pour étudier cette hypothèse, Hoch, Tillmann et Poulin-Charronnat (2007) ont adapté l'étude de Poulin-Charronnat et al. (2005) en intermodalité. Les phrases étaient présentées en modalité visuelle (présentation syllabe par syllabe) et les séquences musicales en modalité auditive. L'Expérience 1 visait à répliquer l'étude de Poulin-Charronnat et al. (2005) en manipulant la relation sémantique du dernier mot de la phrase (e.g., Le chien dort dans la niche vs. tente) alors que l'Expérience 2 étendait l'étude des interactions entre la musique et le langage au traitement syntaxique en manipulant la relation syntaxique du dernier mot avec l'article le précédent (e.g., Le méchant chien dort dans le vs. la niche). Les participants devaient effectuer une tâche de décision lexicale sur le dernier mot de chaque phrase. Les séquences musicales, qui étaient présentées en synchronie avec les phrases (i.e., chaque accord était synchronisé avec chaque syllabe), se terminaient soit par un accord de tonique, soit par un accord de sous-dominante. L'Expérience 1 a montré que la fonction tonale du dernier accord influençait le traitement lexical du mot cible présenté visuellement : les temps de réponse étaient plus courts pour les mots cibles présentés en synchronie avec un accord attendu comparé à un accord moins attendu. En revanche, contrairement à l'étude en chant de Poulin-Charronnat et al., (2005), le traitement musical ne modulait pas le traitement sémantique (i.e., effets d'amorçage sémantique similaires pour les deux accords cibles). L'Expérience 2 a révélé une interaction entre les traitements musical et syntaxique avec un effet d'amorçage syntaxique plus fort lorsque le mot cible était présenté en synchronie avec un accord attendu plutôt qu'avec un accord moins attendu. Alors que l'Expérience 1 suggère l'influence de processus attentionnels guidés par les structures musicales (Escoffier & Tillmann, 2008), l'Expérience 2 supporte la SSIRH (Patel, 2003).

Très récemment (Slevc, Rosenberg, & Patel, sous presse), les interactions entre les traitements musical, syntaxique et sémantique en intermodalité ont été étudiées avec un paradigme de « self-paced reading » qui consiste à recueillir les temps de lecture (i.e., pour afficher la propo-

sition suivante de la phrase les participants devaient appuyer sur une touche). La cohérence syntaxique ainsi que la cohérence sémantique des phrases présentées visuellement étaient manipulées. En même temps que les participants lisaient les phrases, ils entendaient une séquence d'accords contenant un accord appartenant ou non à une autre tonalité (i.e., accord inattendu) que celle de la séquence. L'accord cible était présenté en synchronie avec le mot introduisant une violation de la structure syntaxique ou sémantique. Les temps de lecture pour les mots syntaxiquement incohérents étaient d'autant plus lents qu'ils étaient présentés avec un accord inattendu par rapport à un accord attendu. Un tel effet n'était pas observé pour les mots sémantiquement incohérents. En accord avec Hoch et al. (2007), cette étude montre une interaction entre les traitements syntaxiques en musique et en langage en présentation intermodale. En revanche, elle contraste avec l'hypothèse d'un partage des ressources impliquées dans le traitement de la musique et de la sémantique suggérée par l'étude en chant de Poulin-Charronnat et al. (2005).

Une interaction du traitement musical avec la syntaxe linguistique similaire à celle observée par Slevc et al. (sous presse) a récemment été observée pour un matériel chanté avec un paradigme similaire (i.e., « self-paced listening », Fedorenko, Patel, Casasanto, Winaver, & Gibson, sous presse) : la compréhension était plus difficile pour des phrases syntaxiquement complexes et cette difficulté de compréhension était renforcée par une note inattendue par rapport à une note attendue.

#### **4.2. Études électrophysiologiques**

Les interactions entre la musique et le langage aux niveaux syntaxique et sémantique ont également été étudiées en électrophysiologie (Koelsch, Gunter, Wittfoth, & Sammler, 2005 ; Steinbeis & Koelsch, 2008). Ces études utilisaient un paradigme de présentation intermodale. Les phrases (présentées visuellement) se terminaient soit par un mot relié, soit par un mot syntaxiquement ou sémantiquement non relié à la phrase

(i.e., violation de genre pour la syntaxe). Les séquences musicales étaient composées de cinq accords (chaque accord était synchronisé avec un mot de la phrase) et le dernier accord était un accord de tonique ou un accord de sixte napolitaine (i.e., constituant une forte violation de la syntaxe musicale). Dans l'étude de Koelsch et al. (2005), les participants devaient effectuer un jugement de cohérence pour le dernier mot. Pour le langage, le traitement de la violation syntaxique évoquait une onde LAN. Cette onde LAN était modulée par le traitement de la violation musicale qui évoquait une onde ERAN : l'amplitude de la LAN était réduite quand la séquence musicale s'achevait sur un accord inattendu par rapport à un accord attendu. Cette interaction suggère un partage des ressources impliquées dans les traitements musical et syntaxique. En revanche, le traitement sémantique reflété par une onde N400 n'était pas modulé par la violation musicale, suggérant des ressources distinctes pour les traitements musical et sémantique. La violation musicale évoquait une onde ERAN pour les phrases sémantiquement correctes et incorrectes, suggérant que, de manière générale, le traitement des structures musicales pourrait influencer le traitement linguistique via des mécanismes attentionnels (Escoffier & Tillmann, 2008 ; voir aussi Hoch et al., 2007, section 4.1).

Dans l'étude de Steinbeis et Koelsch (2008), les participants étaient en situation de double tâche : ils devaient effectuer une tâche de mémoire sur les phrases ainsi qu'une tâche de détection de timbre déviant dans les séquences musicales. Le traitement de la violation musicale évoquait une onde ERAN et une onde négative tardive, l'onde N5 (i.e., supposée refléter l'intégration syntaxique dans des séquences musicales, Poulin-Charronnat, Bigand, & Koelsch, 2006). L'onde ERAN interagissait avec le traitement syntaxique en langage (reflété par l'onde LAN) : comme dans Koelsch et al. (2005), l'amplitude de la LAN était réduite quand la séquence musicale s'achevait par un accord inattendu. Par ailleurs, l'onde ERAN était réduite quand la phrase était syntaxiquement incorrecte. Contrairement à l'onde ERAN qui n'était pas affectée par le traitement sémantique (Koelsch et al., 2005), l'amplitude de l'onde N5

était réduite quand le mot final était sémantiquement non relié. En contraste avec des études comportementales (Hoch et al., 2007, Slevc et al., sous presse), cette étude électrophysiologique en intermodalité fournit des données qui sont en accord avec l'interaction entre la musique et la sémantique observée en chant (Poulin-Charronnat et al., 2005).

#### **4.3. Étude du fonctionnement déficitaire : le cas des patients aphasiques.**

Bien que le déficit syntaxique linguistique caractéristique des patients aphasiques constitue un terrain propice à l'étude des relations entre la musique et le langage, les études sur le traitement musical chez des patients aphasiques sont relativement rares (voir Patel, 2008 pour une revue). Dans une étude très récente (Patel, Iversen, Wassenar, & Hagoort, 2008), des patients aphasiques et des participants sains devaient juger la cohérence de phrases correctes ou contenant une anomalie syntaxique (i.e., violation de l'accord sujet-verbe) ou sémantique ainsi que la cohérence de séquences musicales contenant ou non un accord appartenant à une autre tonalité. Les performances des patients aphasiques étaient significativement en-dessous des performances des participants sains dans les tâches de détection d'anomalies musicales et syntaxiques, suggérant un déficit syntaxique partagé pour le langage et la musique. Les performances de détection d'anomalies sémantiques étaient égales pour les deux groupes, aphasiques et contrôles. Afin d'écartier une possible influence de la nature explicite de la tâche sur le traitement musical (Tillmann, Peretz, Bigand, & Gosselin, 2007 ; Tillmann, 2005 ; voir aussi section 5.1.), les auteurs ont aussi testé le traitement des relations musicales dans le paradigme d'amorçage avec une tâche de jugement implicite<sup>3</sup> (i.e., juge-

---

<sup>3</sup> Une tâche de jugement de cohérence est dite explicite car elle porte sur la relation entre la cible et son contexte. En contraste, une tâche portant sur une autre dimension que la relation manipulée entre la cible et son contexte est dite implicite. Une tâche de jugement implicite permet de sonder l'influence de la relation manipulée entre la cible et son contexte d'apparition sans demander le traitement explicite de cette relation (e.g., tâche de décision lexicale, jugement de consonance d'un accord, voir Bigand & Pineau, 1997 ; Mimura, Goodglass, & Milberg, 1996 ; Tillmann et al., 2007).

ment de consonance). Les participants devaient effectuer une tâche de jugement de consonance sur le 2<sup>ème</sup> accord d'une paire. L'accord cible était soit un accord attendu (i.e., appartenant à la même tonalité que le premier accord), soit un accord inattendu (i.e., appartenant à une autre tonalité). Comparés aux participants contrôles, les patients aphasiques ne montraient pas d'effet d'amorçage musical. Ce résultat est en accord avec l'hypothèse d'un déficit du traitement syntaxique partagé en musique et en langage chez ce type de patients.

En accord avec la SSIRH (Patel, 2003), l'ensemble des études comportementales, électrophysiologiques et neuropsychologiques présentées dans cette section suggère de manière consistante un partage de ressources pour traiter la syntaxe en musique et en langage, et ceci indépendamment du paradigme (i.e., amorçage, self-paced reading/listening), de la nature de la tâche (i.e., explicite, implicite), du matériel (i.e., type de violation musicale ou linguistique) et des modalités de présentation (i.e., chant<sup>4</sup>, présentation intermodale). En revanche, l'interaction entre le traitement musical et sémantique (non-prédite par la SSIRH) semble moins consistante (i.e., observée dans seulement deux études sur six ; Poulin-Charonnat et al. 2005 ; Steinbeis & Koelsch, 2008), mais suggère néanmoins des ressources partagées pour traiter la musique et la sémantique. L'analyse détaillée des études citées dans les sections 2 et 4 met en avant plusieurs facteurs susceptibles d'influencer cette interaction (section 5) et nous conduit à proposer une hypothèse plus large proposant que les traitements musical, syntaxique et sémantique partageraient des ressources d'intégration structurale et temporelle (section 6).

---

<sup>4</sup> Notez qu'une seule étude utilisait le chant pour étudier l'interaction entre les traitements musical et syntaxique. De nouvelles études en chant devront donc répliquer cette interaction.

## 5- FACTEURS CRITIQUES INFLUENÇANT L'INTERACTION ENTRE LE TRAITEMENT MUSICAL ET LE TRAITEMENT SÉMANTIQUE.

### 5.1. Rôle de la nature de la tâche expérimentale : explicite vs. implicite.

Contrairement à l'étude de Poulin-Charronnat et al. (2005) qui montre une interaction entre le traitement de la musique et de la sémantique (voir aussi Steinbeis & Koelsch, 2008), l'étude de Besson et al. (1998, voir aussi Bonnel et al., 2001 pour une étude comportementale) a suggéré des processus indépendants en utilisant un matériel chanté avec une situation de double tâche. Mais ces deux études diffèrent sur plusieurs points. Au-delà d'une différence de matériel, l'absence d'interaction dans l'étude de Besson et al. (1998, voir aussi Bonnel et al., 2001) pourrait être liée à la nature de la tâche : cette étude utilisait deux tâches de jugement explicite (i.e., tâche de jugement de cohérence musicale et sémantique) qui auraient pu inciter les participants à analyser séparément les structures musicales et sémantiques et entraîner une diminution des effets d'interférence entre les traitements musical et sémantique. Par ailleurs, les courbes électrophysiologiques obtenues par Besson et al. (1998) suggèrent une onde N400 (i.e., supposée refléter le traitement sémantique) plus petite quand les extraits s'achevaient sur une note musicalement incohérente avec le contexte que sur une note cohérente (voir

---

<sup>5</sup> Notez que les études de Besson et al. (1998, voir aussi Bonnel et al., 2001) et Poulin-Charronnat et al. (2005) diffèrent aussi par leur matériel. Alors que Besson et al. (1998) utilisaient des mélodies, Poulin-Charronnat et al. (2005) utilisaient des séquences d'accords. De plus, les mélodies de Besson et al. (1998) pouvaient contenir une forte violation musicale (i.e., note en-dehors de la tonalité), constituant un événement impossible dans le contexte musical, alors que les séquences d'accords de Poulin-Charronnat et al. (2005) pouvaient contenir une violation plus subtile (i.e., accord de sous-dominante) constituant un événement peu attendu mais possible. En interaction avec la nature de la tâche expérimentale, de telles différences de matériel pourraient aussi influencer les interactions entre la musique et le langage.

Figure 2, p. 496). Cette réduction de la N400 serait en accord avec les données comportementales de Poulin-Charronnat et al. (2005), mais ce patron interactif n'était pas significatif. Poulin-Charronnat et al. (2005) qui utilisaient une tâche de jugement implicite (i.e., décision lexicale) ont proposé que les effets d'interaction entre les traitements musical et sémantique pourraient être affaiblis par l'utilisation d'une tâche de jugement explicite. En effet, des études portant soit sur les traitements musicaux, soit sur les traitements linguistiques ont suggéré que les tâches implicites étaient plus sensibles à l'étude des traitements musicaux (Tillmann et al., 2007 ; voir aussi Tillmann, 2005) et à l'étude des traitements linguistiques (Mimura et al., 1996 ; van der Linden, 1994) que les tâches explicites.

L'hypothèse d'un rôle de la nature de la tâche est appuyée par l'absence d'interaction entre les traitements musical et sémantique dans une étude en intermodalité utilisant une tâche de jugement explicite (i.e., jugement de cohérence sémantique, Koelsch et al., 2005), et par l'absence de déficit partagé pour ces mêmes traitements chez des patients aphasiques (tâche de détection d'anomalie sémantique, Patel et al., 2008). Cependant, la nature de la tâche n'explique pas l'absence d'interaction dans des études en intermodalité utilisant des tâches linguistiques implicites (Hoch et al., 2007 ; Slevc et al., sous presse). Au-delà de la nature de la tâche, les données suggèrent un rôle de l'attention dans l'étude des effets d'indépendance ou d'interaction : l'utilisation de tâches implicites concurrentes sur la musique et le langage (i.e., situation de double tâche) en intermodalité a permis l'observation d'une interaction entre les traitements musical et sémantique (Steinbeis & Koelsch, 2008) (section 5.2.).

## **5.2. Rôle de l'orientation du focus attentionnel induite par la tâche (simple vs. double tâche) et des modalités de présentation (chant vs. intermodalité).**

Une hypothèse pour expliquer l'absence d'interaction entre les

traitements musical et sémantique dans les études de Hoch et al. (2007) et Slevc et al. (sous presse) est qu'en intermodalité, l'utilisation d'une tâche unique sur le langage dirigerait le focus attentionnel (dont la capacité est limitée, Cowan, 1995 ; Cowan, Elliott, Saults, Morey, Mattox, et al., 2005 ; Lewis, Vasishth, & van Dyke, 2006) vers le langage. L'observation d'un effet simple du traitement musical dans Hoch et al. (2007, voir aussi Koelsch et al., 2005 ; Steinbeis & Koelsch, 2008) pour les phrases sémantiquement correctes et incorrectes suggère que les structures musicales sont traitées, mais que l'effet du traitement de la musique est trop faible pour affecter le traitement sémantique. En revanche, l'utilisation du chant où les dimensions musicales et linguistiques sont intégrées dans un même signal acoustique (Poulin-Charronnat et al., 2005), ainsi que l'utilisation d'une double tâche (i.e., sur le langage et la musique) en intermodalité (Steinbeis & Koelsch, 2008) permettrait de partager les ressources attentionnelles entre les deux dimensions. Ce partage renforcerait l'effet du traitement musical et permettrait d'observer une interaction avec le traitement sémantique. De futures études devront s'intéresser au rôle de l'orientation du focus attentionnel dans le traitement conjoint de la musique et du langage en manipulant les modalités de présentation (chanté, parlé, visuel) et/ou le focus de la tâche (i.e., situation de simple tâche (musique ou langage) vs. double tâche (musique et langage)). De même, la nature plus ou moins engageante du matériel musical ou linguistique utilisé pourrait aussi moduler la répartition des ressources attentionnelles et influencer les effets d'interaction. L'hypothèse serait que le traitement d'un matériel varié ou attentionnellement attractif consommerait plus de ressources attentionnelles qu'un matériel répétitif et ennuyeux et par conséquent affaiblirait les effets d'interaction.

Contrairement à l'interaction du traitement musical avec la sémantique, l'interaction avec la syntaxe ne semble pas être affectée par la nature de la tâche ou par l'orientation du focus attentionnel. Une raison serait qu'en comparaison du traitement sémantique, le traitement syntaxique en langage impliquerait plus de ressources partagées avec le traitement musical (section 6). Cependant, un rôle de la nature de la tâche ou de l'orientation du focus attentionnel ne peut pas être exclu : l'interac-

tion avec la syntaxe pourrait être renforcée par l'utilisation d'une tâche implicite, d'un matériel chanté ou encore par l'utilisation d'une double tâche.

## **6- MUSIQUE, SYNTAXE ET SÉMANTIQUE : DES RESSOURCES D'INTÉGRATION STRUCTURALE ET TEMPORELLE PARTAGÉES ?**

L'ensemble des études comportementales, électrophysiologiques et neuropsychologiques présentées en sections 2 et 4 soutiennent la SSIRH (Patel, 2003, voir section 3). La SSIRH telle que Patel (2003 ; 2008) l'a formulée ne fait aucune prédiction sur d'éventuels effets interactifs entre la musique et la sémantique. Cependant, l'observation d'une interaction entre les traitements musical et sémantique dans quelques études incite à réfléchir sur la nature des ressources que le traitement de la musique et du langage pourraient partager. La SSIRH propose un partage des ressources impliquées dans les processus d'intégration structurale des événements musicaux et linguistiques ainsi que dans les processus de mémoire de travail. L'intégration de structures syntaxiques complexes (violations syntaxiques en langage ou en musique) engendrerait un coût de traitement (Gibson, 1998 ; Lerdahl, 2001) conduisant à l'hypothèse d'effets d'interférence dans leurs traitements simultanés. Mais comme la théorie de Gibson (1998), la SSIRH focalise sur les traitements syntaxiques et tend à assimiler « intégration structurale » à « intégration syntaxique ». Pourtant Gibson (1998) n'exclut pas la nécessité d'une intégration structurale des événements linguistiques au niveau de leur contenu sémantique : « *The process of comprehending a sentence involves structuring a sequence of words syntactically and semantically to arrive at a representation of the sentence's meaning. These processes consume computational resources. [...] an important part of understanding how humans process language involves understanding the relationship between the sentence processing mechanism and the available computational resources. (pp.1-2)* ». En

s'appuyant sur des recherches en linguistique et en neurosciences, la présente section argumente que les traitements syntaxique et sémantique nécessitent des ressources d'intégration structurale et temporelle qui pourraient être partagées avec le traitement de la musique.

Dans son modèle d'architecture parallèle du langage, Jackendoff (2002) rappelle que le langage est un système structuré par plusieurs niveaux d'organisation : les sons (i.e., structures phonologiques), la syntaxe et la sémantique. Il propose que les composants syntaxiques ne sont pas les seuls composants computationnels du langage (i.e., gouvernés par des règles d'association et de dépendance) : les composants phonologiques et sémantiques seraient également computationnels. Dans une phrase par exemple, les structures sémantiques, comme les structures syntaxiques, nécessiteraient d'être reliées entre elles via des processus d'intégration structurale afin de construire une représentation de la phrase. L'intégration de ces informations se ferait en parallèle au cours du développement temporel de la phrase et aboutirait à la construction de structures plus larges (Hagoort, 2005). Dans le traitement d'une phrase, chaque événement entrant doit être intégré structurellement et temporellement aux niveaux syntaxique et sémantique dans un ensemble cohérent incluant les événements précédents afin de créer un modèle de situation et d'accéder à la signification globale (Hagoort, 2005 ; Kintsch, 1988 ; van Dijk & Kintsch, 1983). Ces processus d'intégration structurale et temporelle sont des processus on-line (i.e., en temps réel) qui nécessitent des ressources de mémoire de travail pour maintenir actifs les événements déjà traités et mettre à jour le modèle de situation en fonction des nouveaux événements entrants, et ceci aux niveaux syntaxique et sémantique (Gibson, 1998 ; Gunter, Jackson, & Mulder, 1995 ; Kolk, Chwilla, van Herten, & Oor, 2003). Dans son modèle de la mémoire de travail, Cowan (1995 ; Cowan et al., 2005) propose que les processus de mémoire de travail puisent dans les ressources attentionnelles. Ce lien étroit entre mémoire de travail et attention suggère que les processus d'intégration pourraient être sensibles à l'orientation du focus attentionnel (section 5).

L'inconsistance de l'interaction du traitement musical avec le trai-

tement sémantique par rapport à l'interaction avec la syntaxe suggère que les traitements sémantique et syntaxique diffèrent. Une hypothèse est que le traitement syntaxique (i.e., complexité syntaxique ou violation de genre) nécessite plus de ressources d'intégration structurale et temporelle que le traitement sémantique (i.e., violation des attentes sémantiques). Nous remarquons par ailleurs que les études psycholinguistiques se sont surtout intéressées à l'aspect computationnel de la syntaxe plutôt qu'à celui de la sémantique (Jackendoff, 2002 pour une discussion sur le syntaxo-centrisme) et notamment aux difficultés de compréhension des phrases syntaxiquement complexes (i.e., événements distants dans une phrase, Gibson, 1998 ; Patel, 2008). En revanche, Kuperberg (2007) a récemment présenté un ensemble d'études électrophysiologiques suggérant des processus d'intégration structurale et temporelle également pour la sémantique. Alors que le traitement syntaxique est classiquement reflété par une onde P600 et le traitement sémantique par une onde N400 (voir section 2), une onde P600 (parfois suivie d'une N400 réduite) est aussi observée en réponse au traitement d'une violation sémantique reposant sur la manipulation de la relation verbe-arguments (Kolk et al., 2003 ; voir Kuperberg, 2007 pour une revue). Kuperberg (2007) propose un modèle de traitement du langage basé sur deux mécanismes : un mécanisme associatif qui reposerait sur la récupération des connaissances en mémoire à long terme (i.e., reflété par l'onde N400), et un mécanisme dit "computationnel" qui reposerait sur des processus d'intégration des événements selon des contraintes syntaxiques et sémantiques (i.e., reflété par l'onde P600). Cette proposition s'accorde aussi avec une étude de Simpson, Peterson, Casteel et Brugges (1989) montrant que l'activation diffuse des connaissances sémantiques seule ne peut pas expliquer les faibles effets d'amorçage sémantique en contexte temporellement désorganisé (e.g., quatre avec pour chaises sa aller Jean nouvelle achète table vs. boîte). Cette étude suggère que les informations lexicales, syntaxiques et le contenu du message participent à l'intégration sémantique. Ainsi, le traitement sémantique nécessiterait des processus d'intégration au-delà du traitement des associations sémantiques.

Les phrases utilisées dans les études décrites en sections 2 et 4 violaient la relation sémantique d'un mot cible avec le contexte (e.g., Le chien dort dans la tente). Ce type de phrases pourrait surtout engager des processus de récupération des connaissances en mémoire à long terme via un mécanisme d'association des concepts, mais peu de ressources d'intégration structurale ou temporelle, conduisant à de faibles effets d'interférence entre la musique et la sémantique. A contrario, les études citées par Kuperberg (2007) violaient la relation verbe-arguments sans violer les associations sémantiques entre les mots (e.g., « Au petit déjeuner l'œuf mange... », dans cette phrase (syntaxiquement correcte) tous les mots appartiennent à un même champ sémantique, pourtant la phrase est sémantiquement incorrecte). En conservant les associations sémantiques intactes, ce type de violation sémantique pourrait essentiellement impliquer des ressources d'intégration structurale et temporelle autorisant l'observation d'une P600 (avec une N400 réduite ou non). L'utilisation de phrases violant la structure sémantique des phrases via une violation de la relation verbe-arguments plutôt que via une violation des relations sémantiques pourrait donc renforcer les effets d'interférence entre les traitements musical et sémantique.

Des processus d'intégration structurale et temporelle pourraient donc être nécessaires aux traitements musical et syntaxique ainsi qu'au traitement sémantique. Plusieurs études neurophysiologiques sur les traitements musicaux et linguistiques ont par ailleurs montré des corrélats neurophysiologiques suggérant des ressources neuronales partagées. Les traitements musical, syntaxique et sémantique impliquent notamment des régions préfrontales latérales (e.g., gyrus frontal inférieur, opercules frontaux, Maess et al., 2001, Tillmann et al., 2003, 2006, pour les traitements musicaux ; Friederici, Rüschemeyer, Hahne, & Fiebach, 2003, Uchiyama, Toyoda, Honda, Yoshida, Kochiyama, et al., 2008, pour les traitements linguistiques) ainsi que des régions temporales supérieures et médiales (i.e., le sulcus/gyrus temporal supérieur postérieur et le gyrus temporal médian, Friederici, 2001, Friederici et al., 2003 ; Tillmann et al., 2006). Ces activations temporales supérieures et médiales reflèteraient égale-

ment des processus d'intégration temporelle comme ceux impliqués dans le traitement phonologique des mots (Wise, Scott, Blank, Mummery, Murphy, & Warburton, 2001). D'autres études ont suggéré que les activations préfrontales latérales reflèteraient également des processus d'intégration d'indices gestuels et d'images (Willems, Özyürek, & Hagoort, 2005 ; 2008) ainsi que plus généralement des traitements on-line (Hagoort, 2005) et des processus d'intégration temporelle des comportements (Fuster, 2001). Ces régions cérébrales se caractériseraient par une fonction d'intégration structurale et temporelle au-delà de la nature linguistique ou musicale de l'information traitée. Ces études électrophysiologiques (voir Kuperberg, 2007 pour une revue) et neurophysiologiques suggèrent que l'intégration des structures au cours du temps nécessite des ressources neuronales et pourrait refléter un mécanisme général au traitement de toute information temporellement et structurellement organisée comme des films, des histoires imagées, des séquences de mouvement (danse), des séries arithmétiques ou des séquences d'action réelles (voir Kuperberg, 2007, pour une étude sur le traitement des actions dans un environnement réel).

L'ensemble des données comportementales, neurophysiologiques et neuropsychologiques rapportées dans cette revue conduisent à l'hypothèse que non seulement les traitements musical et syntaxique (SSIRH, Patel, 2003), mais aussi les traitements musical et sémantique partageraient des ressources d'intégration structurale et temporelle. L'inconsistance de l'interaction entre la musique et la sémantique comparée à la forte consistance de l'interaction entre la musique et la syntaxe suggère que le traitement syntaxique engagerait plus de ressources d'intégration comparé au traitement sémantique qui bénéficierait aussi de l'activation diffuse des connaissances stockées en mémoire à long terme. En proposant qu'au-delà de la musique et du langage, les processus d'intégration pourraient être des mécanismes généraux, cette revue incite à conduire de nouvelles études utilisant divers matériels structurellement et temporellement organisés – comme des films, des séquences d'actions réelles, des séries arithmétiques ou des séquences de danse – afin de mieux com-

prendre les processus d'intégration structurale et temporelle ainsi que la spécificité des ressources engagées par de tels processus.

**Remerciements :**

Merci à Ani D. Patel pour les discussions sur le thème des interactions entre le traitement de la musique et du langage.

**ABSTRACT**

**Music, syntax and semantics : shared structural and temporal integration resources ?**

Numerous behavioral, neurophysiological and neuropsychological studies have investigated the specificity of music and language processing. While some studies suggested independent processes, other studies revealed common neural resources and interactive influences for music and language. Patel (2003) proposed that music and language share neural resources for processes linked to the structural integration of events, notably for musical and linguistic syntactic processing ("Shared Syntactic Integration Resource Hypothesis", SSIRH). The SSIRH has led to a series of studies suggesting more consistent interactive influences between music and syntax than between music and semantics. Based on a review of the literature, the present article aims to reconcile the data from the literature about music and language processing, by proposing a hypothesis of shared structural and temporal integration resources for music, syntax and semantics.

## RÉFÉRENCES

- Basso, A., & Capitani, E. (1985). Spared musical abilities in a conductor with global aphasia and ideomotor apraxia. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, *48*, 407-412.
- Besson, M. & Schön, D. (2003). Comparison between language and music. In I. Peretz, & R.J. Zatorre (Eds), *The cognitive neuroscience of music*, (pp. 413-429). New York: Oxford University Press.
- Besson, M., Faïta, F., Peretz, I., Bonnel, A. M., & Requin, J. (1998). Singing in the brain: Independence of lyrics and tunes. *Psychological Science*, *9*, 494-498.
- Bigand, E., & Pineau, M. (1997). Global context effects on musical expectancy. *Perception and Psychophysics*, *59*, 1098-1107.
- Bigand, E., Tillmann, B., Poulin, B., D'Adamo, D. A., & Madurell, F. (2001). The effect of harmonic context on phoneme monitoring in vocal music. *Cognition*, *81*, B11-B20.
- Bonnel, A. M., Faïta, F., Peretz, I., & Besson, M. (2001). Divided attention between lyrics and tunes of operatic songs : Evidence for independent processing. *Perception & Psychophysics*, *63*, 1201-1213.
- Cowan, N. (1995). *Attention and memory: an integrated framework*. New York : Oxford University Press.
- Cowan, N., Elliott, E. M., Saults, J. S., Morey, C. C., Mattox, S., Hismjatullina, A., Conway, A. R. A. (2005). On the capacity of attention: its estimation and its role in working memory and cognitive aptitudes. *Cognitive Psychology*, *51*, 42-100.
- Escoffier, N., & Tillmann, B. (2008). The tonal function of a task-irrelevant chord modulates speed of visual processing. *Cognition*, *107*(3), 1070-1080.
- Fedorenko, E., (2008). Structural integration in language and music: A Shared System. *Presentation at the Music, Language and the Mind*. Tufts, Massassuchets.
- Fodor, J. A. (1983). *Modularity of mind: an essay on faculty psychology*. Cambridge, Massassuchet : MIT Press.
- Friederici, A. D. (2001). The neural basis of sentence processing: a neurocognitive model. In Hickok, G. & Poeppel, D. (eds), *Towards a new functional anatomy of language cognition* (Special Issue).
- Friederici, A. D., Rüschemeyer, S.-A. Hahne, A., & Fiebach, C. (2003). The role of left inferior frontal and superior temporela cortex in sentence comprehension: lo-

- calizing syntactic and semantic processes. *Cerebral cortex*, 13, 170-177.
- Friederici, A., Pfeifer, E., & Hahne, A. (1993). Event-related brain potentials during natural speech processing: Effects of semantic, morphological and syntactic violations. *Cognitive Brain Research*, 1, 183–192.
- Fuster, J. M. (2001). The prefrontal cortex – an update : time is of the essence. *Neuron*, 30, 319-330.
- Gibson, E. (1998). Linguistic complexity: locality of syntactic dependencies. *Cognition*, 76(1), 1-76.
- Gunter, T. C., Jackson, J. L., & Mulder, G. (1995). Language, memory and aging: an electrophysiological exploration of the N400 during reading of memory-demanding sentences. *Psychophysiology*, 32, 215-229.
- Hagoort, P. (2005). On Broca, brain, and binding: a new framework. *Trends in Cognitive Sciences*, 9, 416-423.
- Hagoort, P., Brown, C., & Groothusen, J. (1993). The syntactic positive shift (SPS) as an ERP measure of syntactic processing. *Language and Cognitive Processes*, 8, 439–483.
- Hoch, L., & Tillmann, B. (*soumis*). Spoken syllable identification is influenced by the tonal function of chords presented to the contralateral ear.
- Hoch, Tillmann, & Poulin-Charronnat (2007). Influence de la fonction harmonique d'un accord sur les traitements syntaxique et sémantique en langage. Présenté au Colloque Atelier "Musique, Langage, Cerveau", 17-18 janvier 2008, Dijon (France).
- Jackendoff, (2002). *Foundations of language : Brain, Meaning, Grammar, Evolution*. New York : Oxford University Press.
- Kintsch, W. (1988). The role of knowledge in discourse comprehension: a construction)integration model. *Psychological Review*, 95(2), 163-182.
- Koelsch, S., & Mulder, J. (2002). Electric brain responses to inappropriate harmonies during listening to expressive music. *Clinical Neurophysiology*, 113, 862-869.
- Koelsch, S., Gunter, T., Friederici, A.D., & Schröger, E. (2000). Brain indices of music processing: "nonmusicians" are musical. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(3), 520-541.
- Koeslch, S., Gunter, T. C., v. Cramon, D. Y., Zysset, S., Lohmann, G., & Friederici, A. D. (2002). Bach speaks: a cortical "language-network" serves the processing of music. *NeuroImage*, 17, 956-966.

- Koeslch, S., Gunter, T. C., Wittfoth, M., & Sammler, D. (2005). Interaction between syntax processing in language and in music: an ERP study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *17*, 1565-1577.
- Kolk, H. H. J., Chwilla, D. J., van Herten, M., & Oor, P. J. W. (2003). Structure and limited capacity in verbal working memory: A study with event-related potentials. *Brain and Language*, *85*, 1-36.
- Kuperberg, G. R. (2007). Neural mechanisms of language comprehension : Challenges to syntax. *Brain Research*, *1146*, 23-49.
- Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1980). Reading senseless sentences: Brain potentials reflect semantic incongruity. *Science*, *207*, 203-205.
- Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1983). Event-Related brain Potentials to grammatical errors and semantic anomalies. *Memory & Cognition*, *11*, 539-550.
- Lerdahl, F. (2001). *Tonal Pitch Space*. New York : Oxford University Press.
- Lerdahl, F., & Jackendoff, R. (1983). *A generative theory of tonal music*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Lewis, R. L., Vasishth, S. & van Dyke, J. A. (2006). Computational principles of working memory in sentence comprehension. *Trends in Cognitive Sciences*, *10*(10), 447-454.
- Maess, B., Koelsch, S., Gunter, T. C., & Friederici, A. D. (2001). Musical syntax is processed in Broca's area: an MEG study. *Nature Neuroscience*, *4*, 540-544.
- McNamara, T. P. (2005). *Semantic priming: perspectives from memory and word recognition*. Sussex: Psychology Press.
- Mimura, M., Goodglass, H., & Milberg, W. (1996). Preserved semantic priming effect in alexia. *Brain and Language*, *54*, 434-446.
- Osterhout, L., & Holcomb, P. (1992). Event-Related brain potentials elicited by syntactic anomaly. *Journal of Memory and Language*, *31*, 785-806.
- Patel, A. D. (2003). Language, music, syntax and the brain. *Nature Neuroscience*, *6*, 674-681.
- Patel, A. D., Gibson, E., Ratner, J, Besson, M., & Holcomb, P. J. (1998). Processing syntactic relations in language and music: an event-related potential study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *10*, 71-733.
- Patel, A. D., Iversen, J. R., Waasenaar, M., & Hagoort, P. (2008). Musical syntactic processing in agrammatic Broca's aphasia. *Aphasiology*, *22*(7), 776-789).

- Patel, A.D. (2008). *Music, Language, and the Brain*. Oxford University Press.
- Peretz I., & Coltheart M. (2003). Modularity of music processing. *Nature Neuroscience*, 6, 688-691.
- Peretz, I., Belleville, S., & Fontaine, S. (1997). Dissociation entre musique et langage après atteinte cérébrale: un nouveau cas d'amusic sans aphasie. *Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 51, 354-367.
- Peretz, I., Kolinsky, R., Tramo, M., Labrecque, R., Hublet, C., Demeurisse, G., & Belleville, S. (1994). Functional dissociations following bilateral lesions of auditory cortex. *Brain*, 117, 1283-1301.
- Poulin-Charronnat, B., Bigand, E., & Koelsch, S. (2006). Processing of musical syntax tonic versus subdominant: an event-potential related study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(9), 1545-1554.
- Poulin-Charronnat, B., Bigand, E., Madurell, F., & Peereman, R. (2005). Musical structure modulates semantic priming in vocal music. *Cognition*, 94, B67-B78.
- Simpson, G. B., Peterson, R. R., Casteel, M. A., & Burgess, C. (1989). Lexical and sentence context effects in word recognition. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 15(1), 88-97.
- Slevc, L. R., Rosenberg, J. C., & Patel, A. D. (sous presse). Language, music, and modularity: Evidence for shared processing of linguistic and musical syntax. *Proceedings of the 10<sup>th</sup> Conference on Music Perception & Cognition*. Sapporo, Japan.
- Steinbeis, N. & Koelsch, S. (2008). Shared neural resources between music and language indicate semantic processing of musical tension-resolution patterns. *Cerebral Cortex*, 18, 1169-1178.
- Tillmann, B. (2005). Implicit investigations of tonal knowledge in nonmusician listeners. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1060, 100-110.
- Tillmann, B., Janata, P., & Bharucha, J. J. (2003). Activation of the inferior frontal cortex in musical priming. *Cognitive Brain Research*, 16, 145-161.
- Tillmann, B., Koelsch, S., Escoffier, N., Bigand, E., Lalitte, P., Friederici, A.D., von Cramon, D.Y. (2006). Cognitive priming in sung and instrumental music : Activation of inferior frontal cortex. *NeuroImage*, 31(4), 1771-1782.
- Tillmann, B., Peretz, I., Bigand, E., & Gosselin, N. (2007). Harmonic priming in an amusic patient: the power of the implicit tasks. *Cognitive Neuropsychology*, 24(6), 603-622.
- Uchiyama, Y., Toyoda, H., Honda, M., Yoshida, H., Kochiyama, T., Ebe, K., & Sadato,

- N. (2008). Functional segregation of the inferior frontal gyrus for syntactic processes: A functional magnetic resonance imaging study. *Neuroscience Research*, 61, 309-318.
- van der Linden, M. (1994). Neuropsychologie de la mémoire. In X. Seron, & M. Jean-nerod (Eds.), *Neuropsychologie humaine* (pp. 282–316). Liège: Mardaga.
- van Dijk, T. A., & Kintsch, W. (1983). *Strategies of discourse comprehension*. New York: Academic Press.
- Willems, R. M., Özyürek, A., & Hagoort, P. (2008). Seeing and hearing meaning: ERP and fMRI evidence of word versus picture integration into a sentence context. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(7), 1235-1249.
- Willems, R.M., Özyürek, A., & Hagoort, P. (2005). The comprehension of gesture and speech. *Journal of Cognitive Neuroscience*, Supplément, 17, 231.
- Wise, R. J. S., Scott, S. K., Blank, S. C., Mummery, C. J., Murphy, K., & Warburton, E. A. (2001). Separate neural subsystems within “Wernicke’s area”. *Brain*, 124, 83-95.