

Cours 2016-2017:

**Parole, musique, mathématiques :
Les langages du cerveau**

Stanislas Dehaene
Chaire de Psychologie Cognitive Expérimentale

Cours n°4

Les réseaux cérébraux de la syntaxe musicale

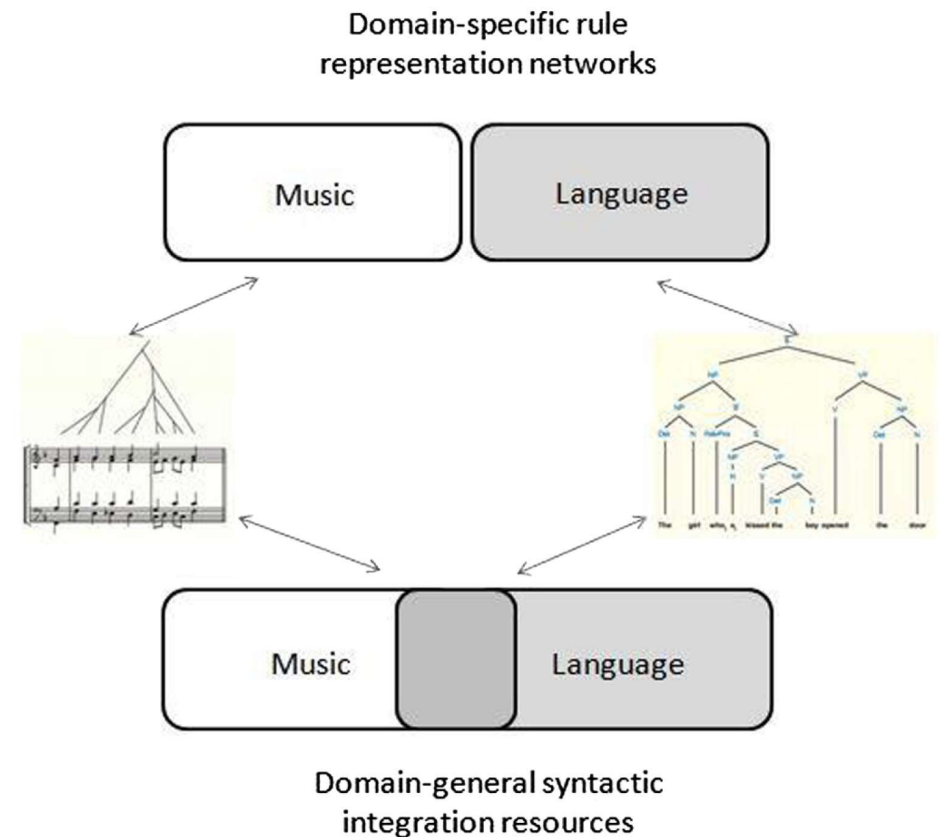
Musique et langage: une ressource syntaxique partagée?

Patel, A. D. (2003). Language, music, syntax and the brain. *Nature Neuroscience*, 6(7), 674–681.

Katz, J., & Pesetsky, D. (2011). The identity thesis for language and music. URL [Http://ling. Auf. net/lingBuzz/000959](http://ling.auf.net/lingBuzz/000959). Retrieved from <http://ling.auf.net/lingbuzz/000959/v1.pdf>

Prédictions:

- Les règles d'organisation propres à la musique et au langage sont distinctes
 - Activation de **régions auditives spécialisés**.
 - **Dissociations entre langage et musique** en neuropsychologie
- L'exécution de ces règles syntaxiques fait appel à des ressources partagées.
 - **Activation de régions cérébrales qui se recouvrent**, particulièrement dans des soustractions qui isolent le **niveau syntaxique**
 - **Interférences entre langage et musique** lorsque nous devons traiter la syntaxe des deux domaines en même temps.

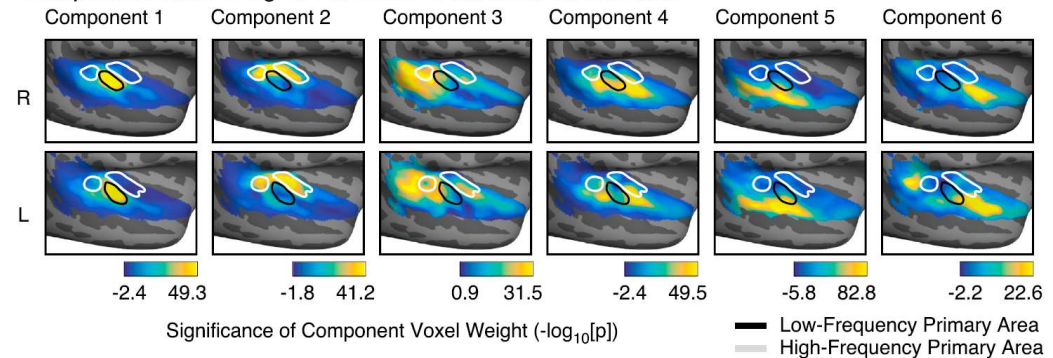


Au niveau sensoriel: Le lobe temporal contient des circuits partiellement superposés et spécialisés pour le langage et la musique

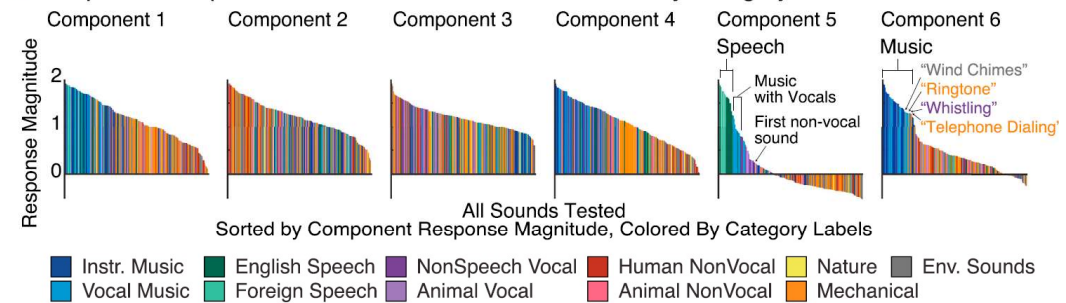
Norman-Haignere, S., Kanwisher, N. G., & McDermott, J. H. (2015). Distinct Cortical Pathways for Music and Speech Revealed by Hypothesis-Free Voxel Decomposition. *Neuron*, 88(6), 1281–1296.

- Mesure, en IRM fonctionnelle, de l'activité cérébrale en réponse à 165 sons de nature extrêmement variée.
- Analyse originale par décomposition linéaire des réponses de chaque voxel.
- 4 composantes reflètent les propriétés spectrales des sons, mais les deux dernières reflètent, respectivement, une préférence pour le langage et pour la musique.
- Chaque voxel exprime une préférence, mais rares sont les voxels purement spécifiques
- Les auteurs concluent à l'existence de codes spécialisés et partiellement superposés.

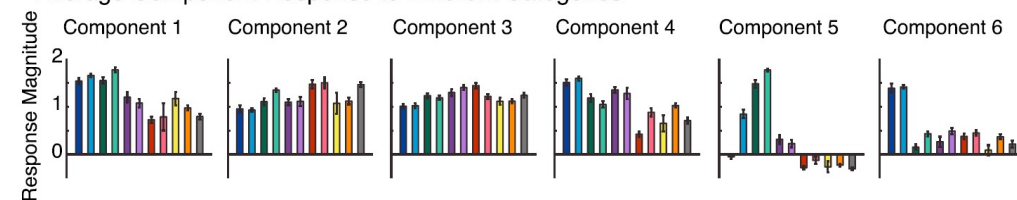
B Component Voxel Weights Plotted in Anatomical Coordinates



D Component Response Profiles to All 165 Sounds Colored by Category



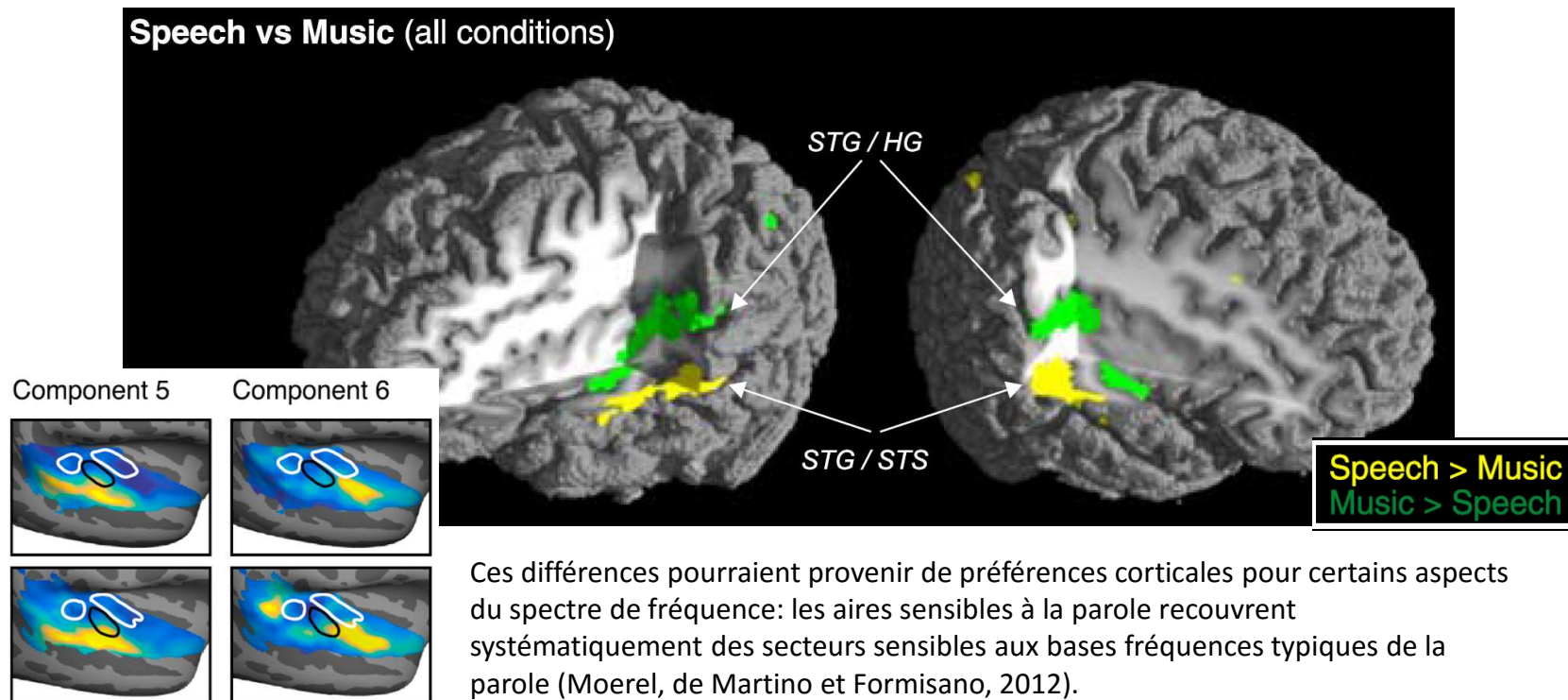
E Average Component Response to Different Categories



Dissociation entre traitement musical et traitement linguistique

Tervaniemi, M., Szameitat, A. J., Kruck, S., Schröger, E., Alter, K., Baene, W. D., & Friederici, A. D. (2006). From Air Oscillations to Music and Speech: Functional Magnetic Resonance Imaging Evidence for Fine-Tuned Neural Networks in Audition. *The Journal of Neuroscience*, 26(34), 8647–8652. <http://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0995-06.2006>

Tervaniemi et coll. ont fait écouter, dans l'IRM, des sons linguistiques (pseudomots bisyllabiques) ou musicaux (deux notes de saxophone), approximativement appariés en durée, en intensité et en contenu spectral. Les activations se recouvrent au niveau de l'aire auditive primaire, mais il existe également une séparation assez nette avec une préférence pour le langage dans le sillon temporal supérieur et la région latérale du gyrus temporal supérieur, et une préférence pour la musique dans la région temporale supérieure, antérieure et postérieure (en accord avec Norman-Haigneré et coll.)

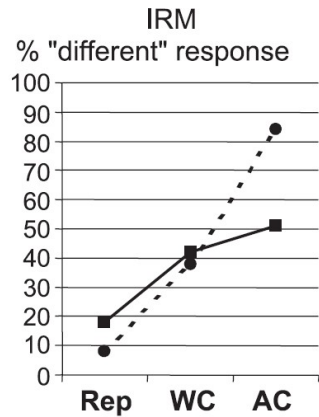


Dissociations entre parole et musique à *stimulus constant*

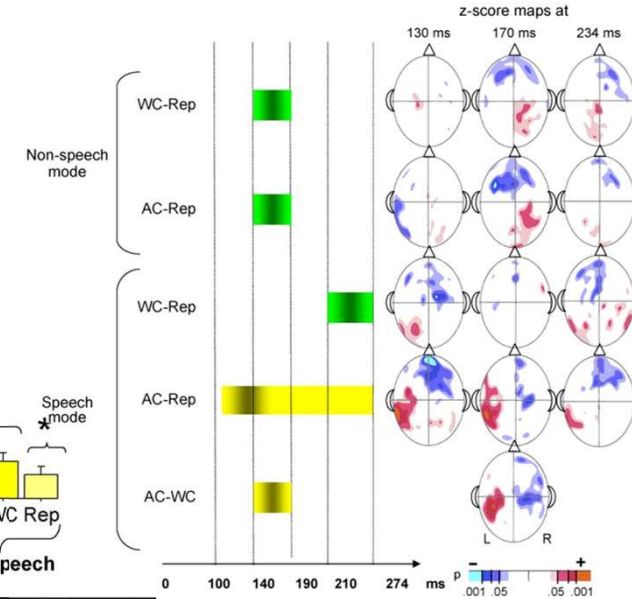
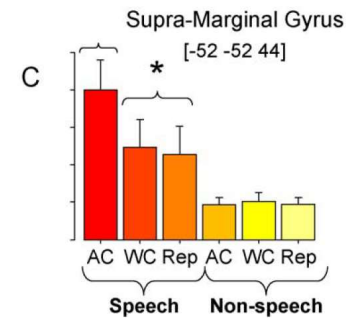
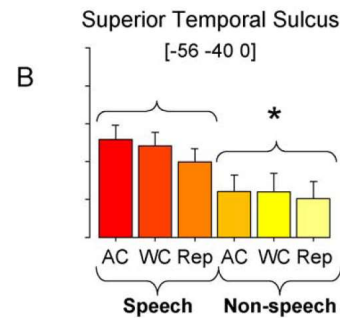
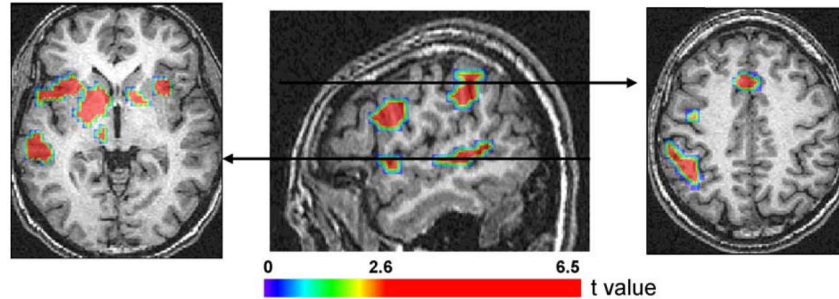
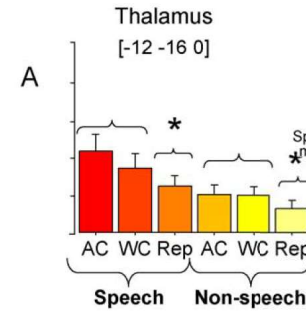
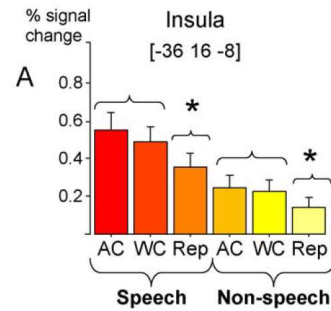
Dehaene-Lambertz, G., Pallier, C., Serniclaes, W., Sprenger-Charolles, L., Jobert, A., & Dehaene, S. (2005). Neural correlates of switching from auditory to speech perception. *Neuroimage*, 24(1), 21–33.



- L'utilisation de la synthèse sinusoïdale de parole permet de faire écouter les mêmes sons, soit comme des sons « musicaux » (synthétiseur), soit comme de la parole (ba ba ba da versus da da da da)
- Pendant l'IRM, les sujets passent du mode « musical » au mode « linguistique ».
- Seule la région du sillon temporal supérieur gauche répond plus dans le mode « parole » que dans le mode « musique ».
- Le mode « parole » permet de mieux percevoir des changements de catégorie phonologique.

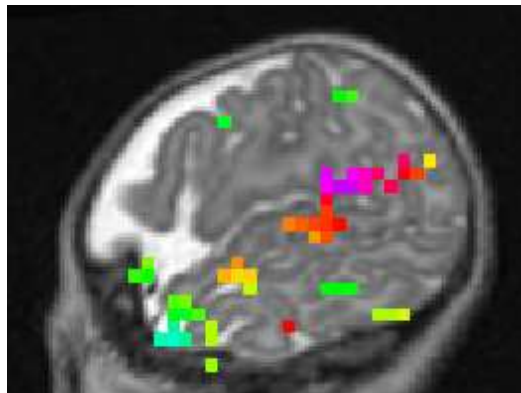
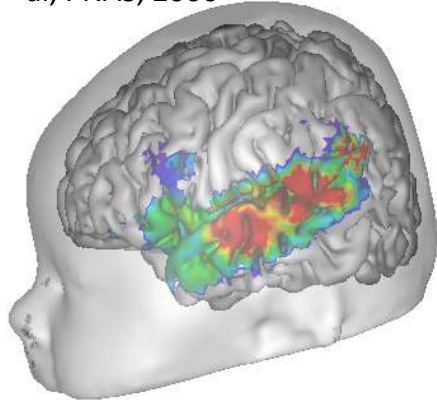


La perception d'une différence phonologique (AC-Rep), dans le mode « langage », active tout un réseau d'aires cérébrales associées au traitement du langage parlé.
→ Recrutement d'un réseau impliqué dans l'articulation, et latéralisé à gauche? (hypothèse de Hickok & Poeppel, 2004)



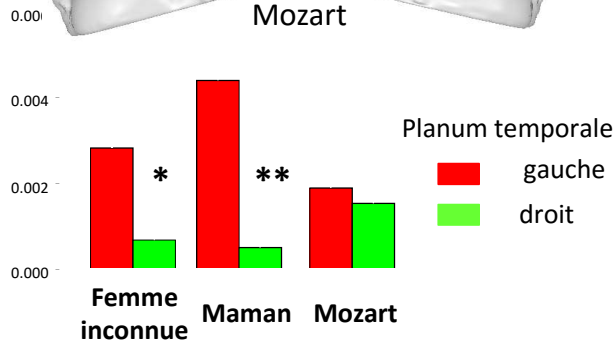
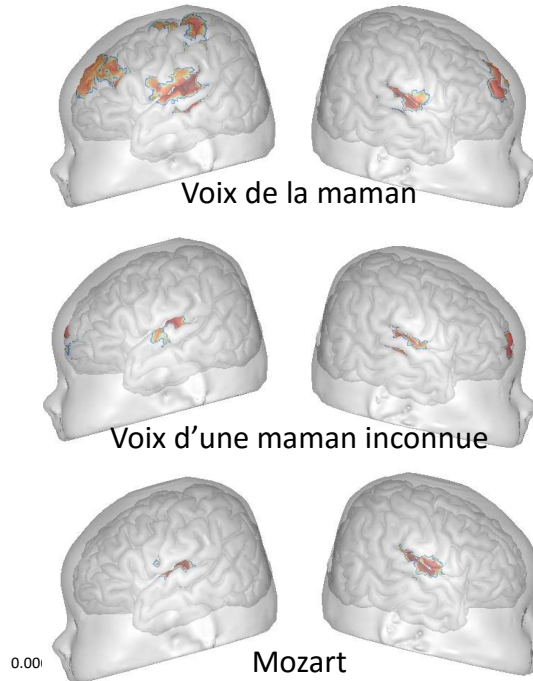
Les potentiels évoqués changent de latéralisation lors du passage du mode « musical » au mode « linguistique ».

Dehaene-Lambertz et al, PNAS, 2006



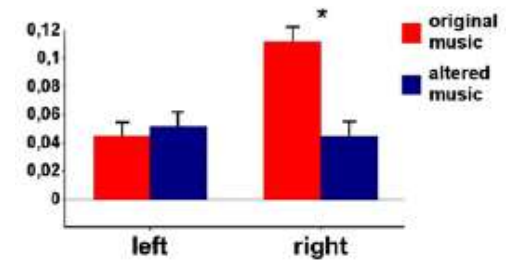
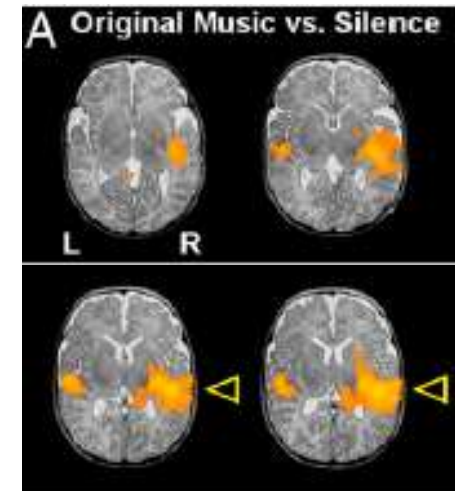
L'écoute de parole active déjà les mêmes aires du langage que chez l'adulte

Langage et musique sont déjà partiellement dissociés dans le cerveau du bébé



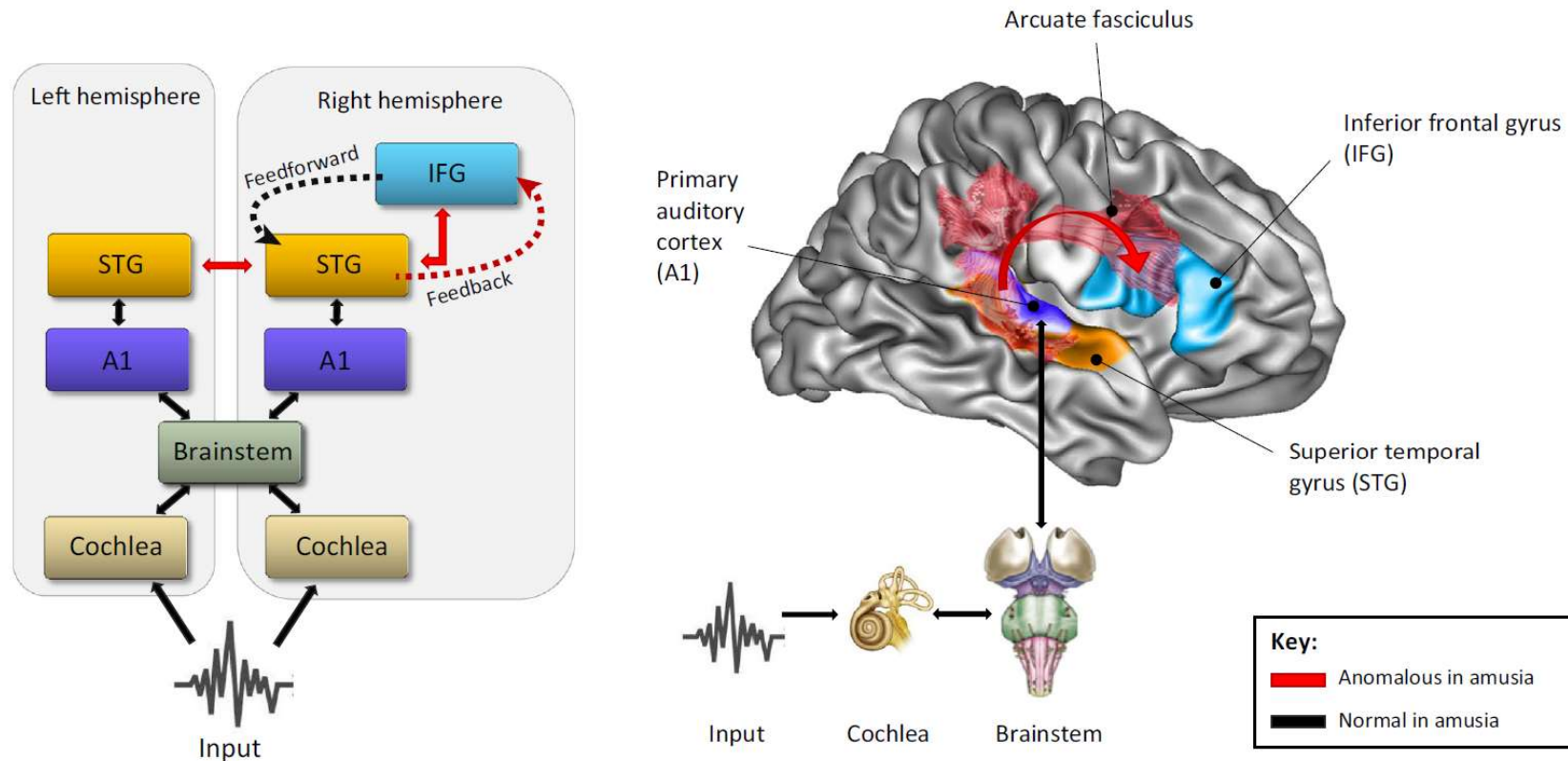
Dehaene-Lambertz et al, *Brain and Language*, 2010

Perani et al. PNAS, 2010 :
Nouveau-nés de 3 jours



Mécanismes de l'amusie congénitale

Peretz, I. (2016). Neurobiology of Congenital Amusia. *Trends in Cognitive Sciences*, 20(11), 857–867.
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2016.09.002>



Trends in Cognitive Sciences

Figure 2. Anomalous Recurrent Processing in the Right Frontotemporal Network. Schematic (left panel) and anatomical representation (right panel) of the anomalies (in red) found in functional and structural connectivity between the right and left superior temporal gyrus (STG) and right inferior frontal gyrus (IFG) in the amusic brain as compared to the normal brain. Current evidence suggests that all other connections from the cochlea up to the STG, including the primary auditory cortex (A1), are normal. The proposed altered recurrent processing as a result of poor feedback control between the IFG and STG is represented by dashed lines.

Dissociations entre Amusie et Aphasie acquises chez l'adulte

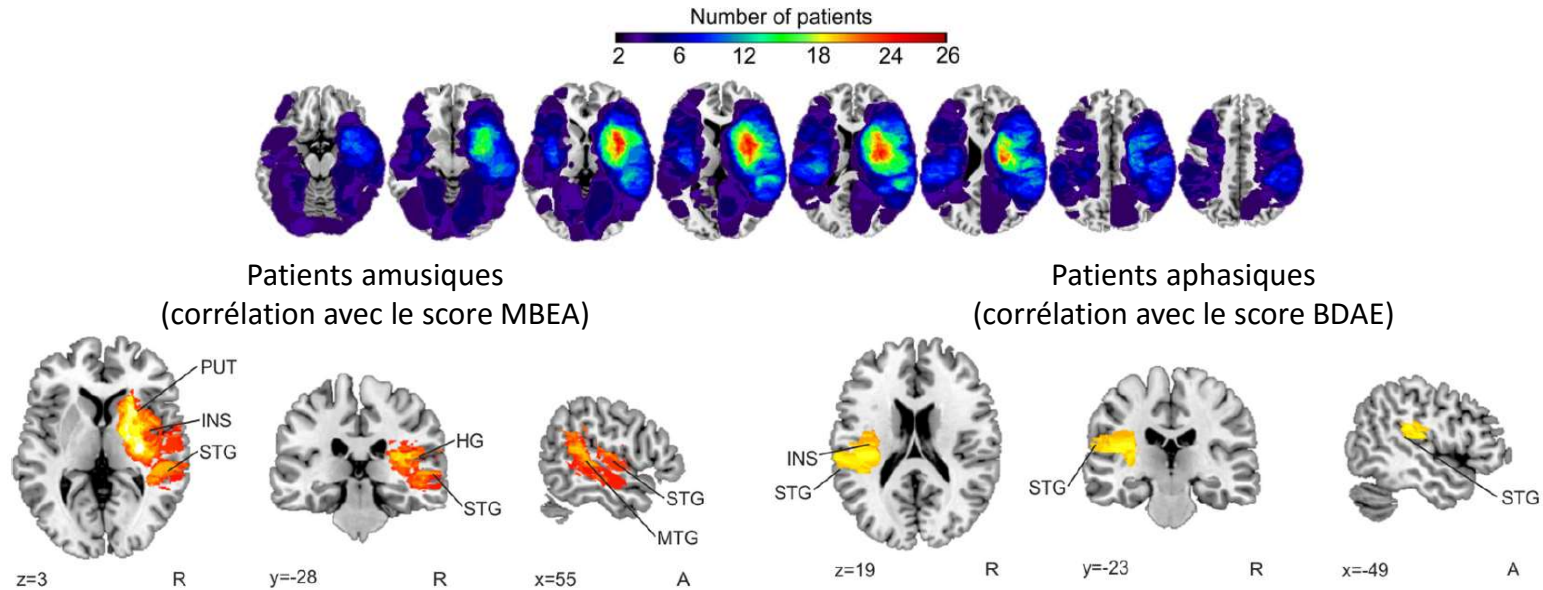
Sihvonen, A. J., Ripollés, P., Leo, V., Rodríguez-Fornells, A., Soinila, S., & Särkämö, T. (2016). Neural Basis of Acquired Amusia and Its Recovery after Stroke. *The Journal of Neuroscience*, 36(34), 8872–8881.

Une lésion cérébrale peut causer une *amusie acquise*, ou au contraire, une *aphasie sans amusie*.

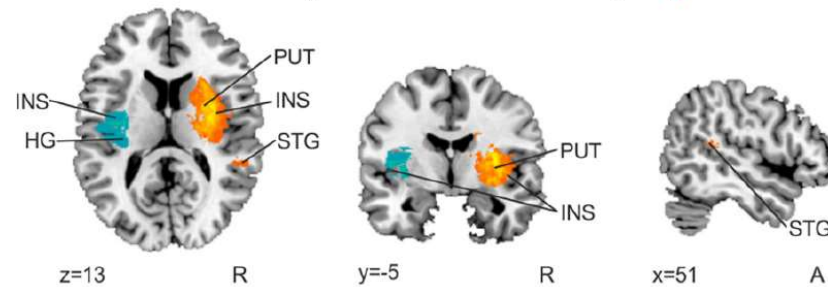
Cas classique de Shebalin, compositeur et professeur au conservatoire de Moscou, qui devenu aphasique a continué à composer des œuvres dont la qualité est jugée inchangée (Luria, Tsvetkova et Futer, 1965), bien que l'on puisse peut-être y détecter de subtiles altérations (travaux de Weiss et Patel,

<http://www.tokyofoundation.org/sylff/12911>).

D'autres cas similaires sont rapportés par Assal (1973), Basso & Capitani (1985), et Signoret et al (1987).



D Only Amusia vs. Only Aphasia



Et au niveau syntaxique?

Syntaxe musicale et syntaxe du langage activent-elles des aires partiellement identiques ?

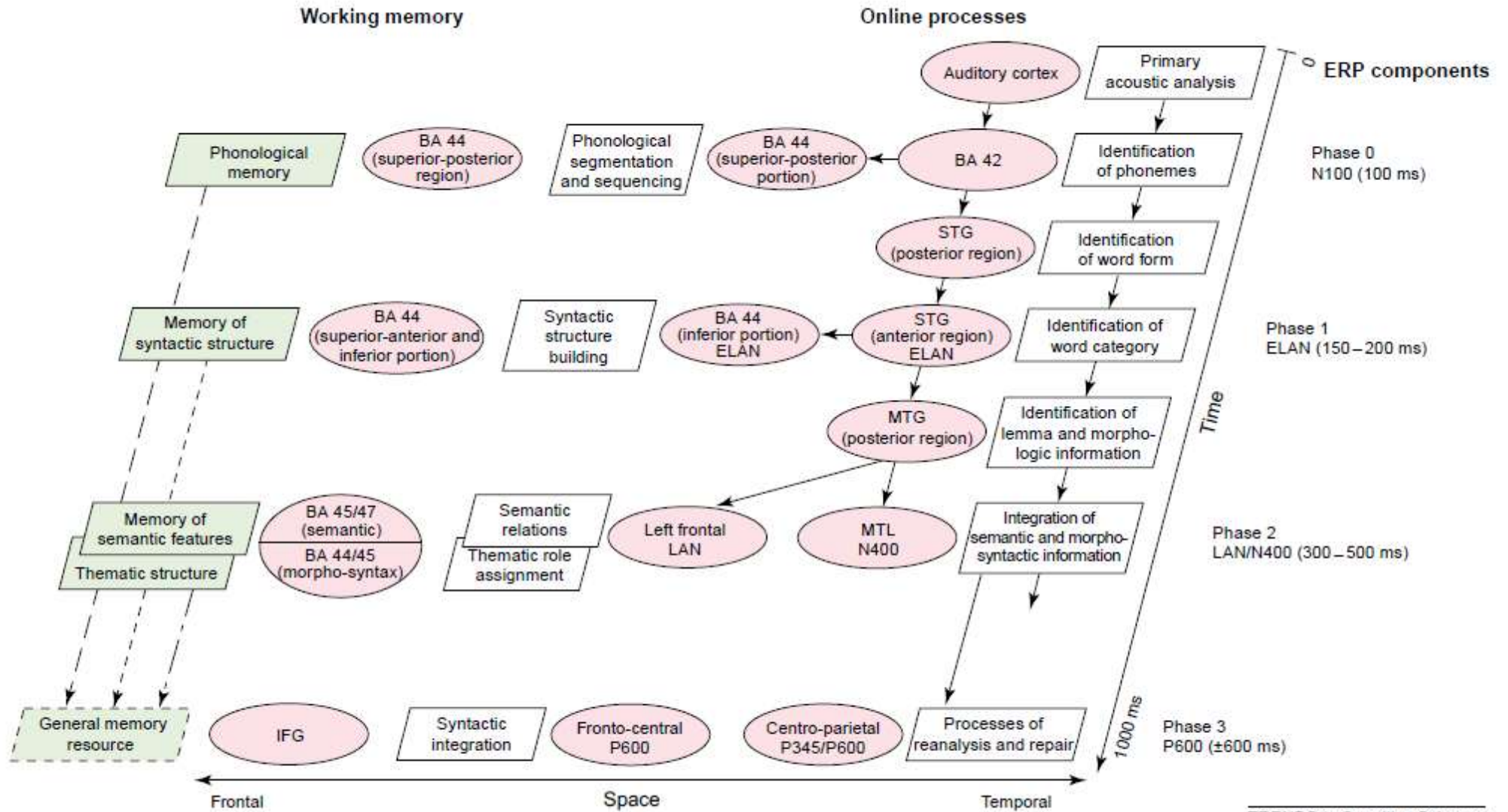
Plan du cours:

- Activité cérébrale évoquée par les violations syntaxiques en musique
- Activité cérébrale évoquée par la complexité des structures musicales.
- Interférences au niveau comportemental et cérébral



Les potentiels évoqués associés à chaque étape de traitement linguistique

Friederici, A. D. (2002). Towards a neural basis of auditory sentence processing. *Trends Cogn Sci*, 6(2), 78–84.



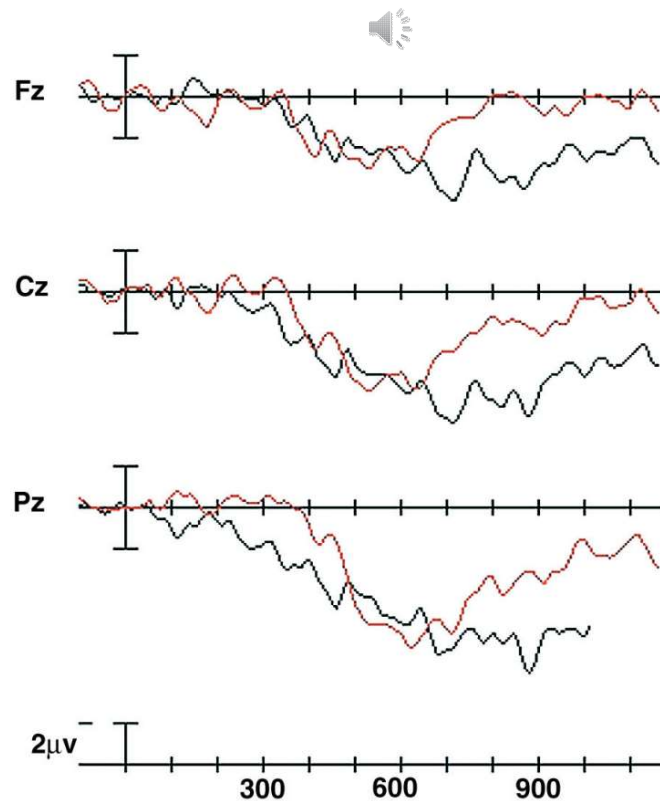
Effet de violation syntaxique en musique

Besson, M., & Macar, F. (1987). An event-related potential analysis of incongruity in music and other non-linguistic contexts. *Psychophysiology*, 24(1), 14–25.

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. *J Cogn Neurosci*, 10(6), 717–33.

Anomalie
linguistique

Anomalie
musicale



Les études initiales des violations musicales au sein d'une mélodie connue ont plutôt montré une réaction tardive et positive (P300, P600).

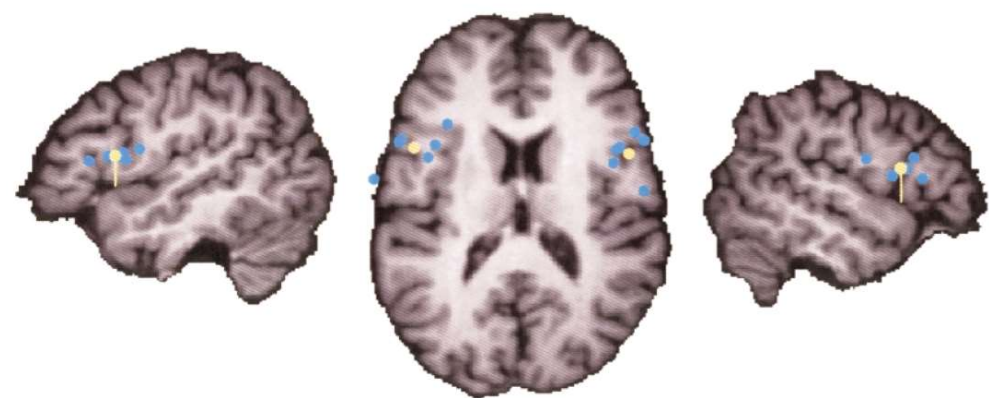
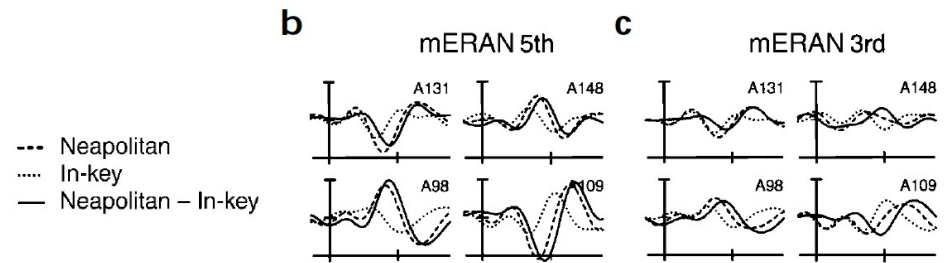
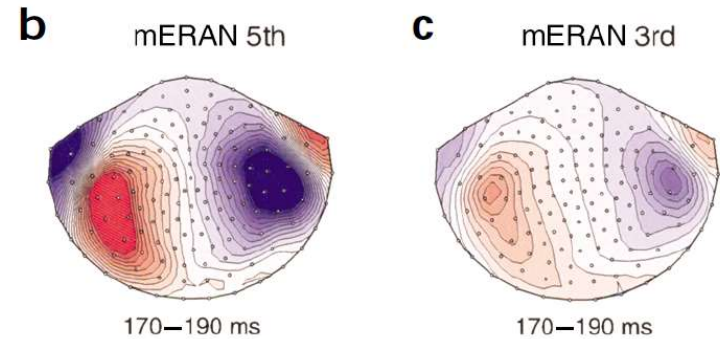
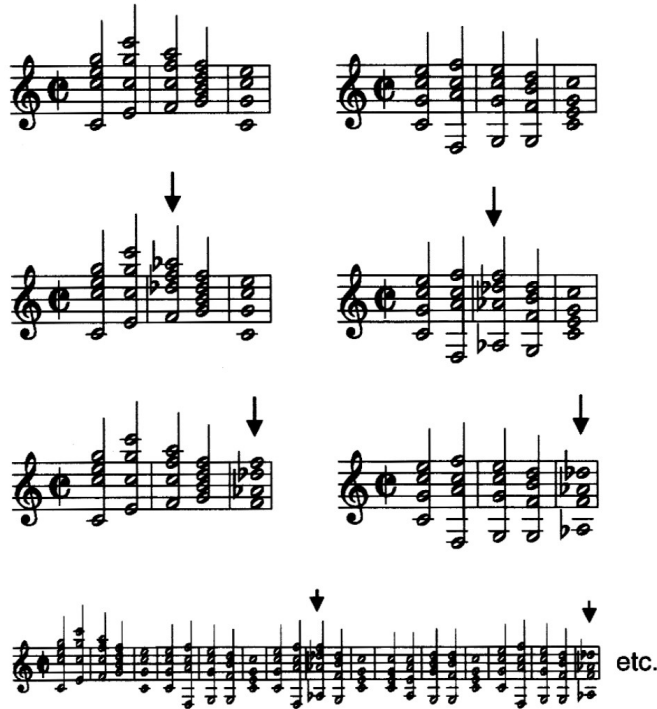
Dans sa revue de *Nature Neuroscience* 2003, Patel insiste sur la similarité des réponses P600 observées en parole et en musique (figure ci-contre, tirée de Patel et al 1998).

Cependant, cette similarité n'est guère convaincante: petit nombre d'électrodes, absence d'analyses intra-sujet. Des ondes P300/P600 similaires sont évoquées dans des contextes très différents, qui tous nécessitent un réexamen conscient de la situation.

Effet de violation syntaxique en musique

Maess, B., Koelsch, S., Gunter, T. C., & Friederici, A. D. (2001). Musical syntax is processed in Broca's area: an MEG study. *Nat Neurosci*, 4(5), 540–5.

Introduction inattendue d'accords « napolitains » dont deux notes ne sont pas dans la bonne tonalité



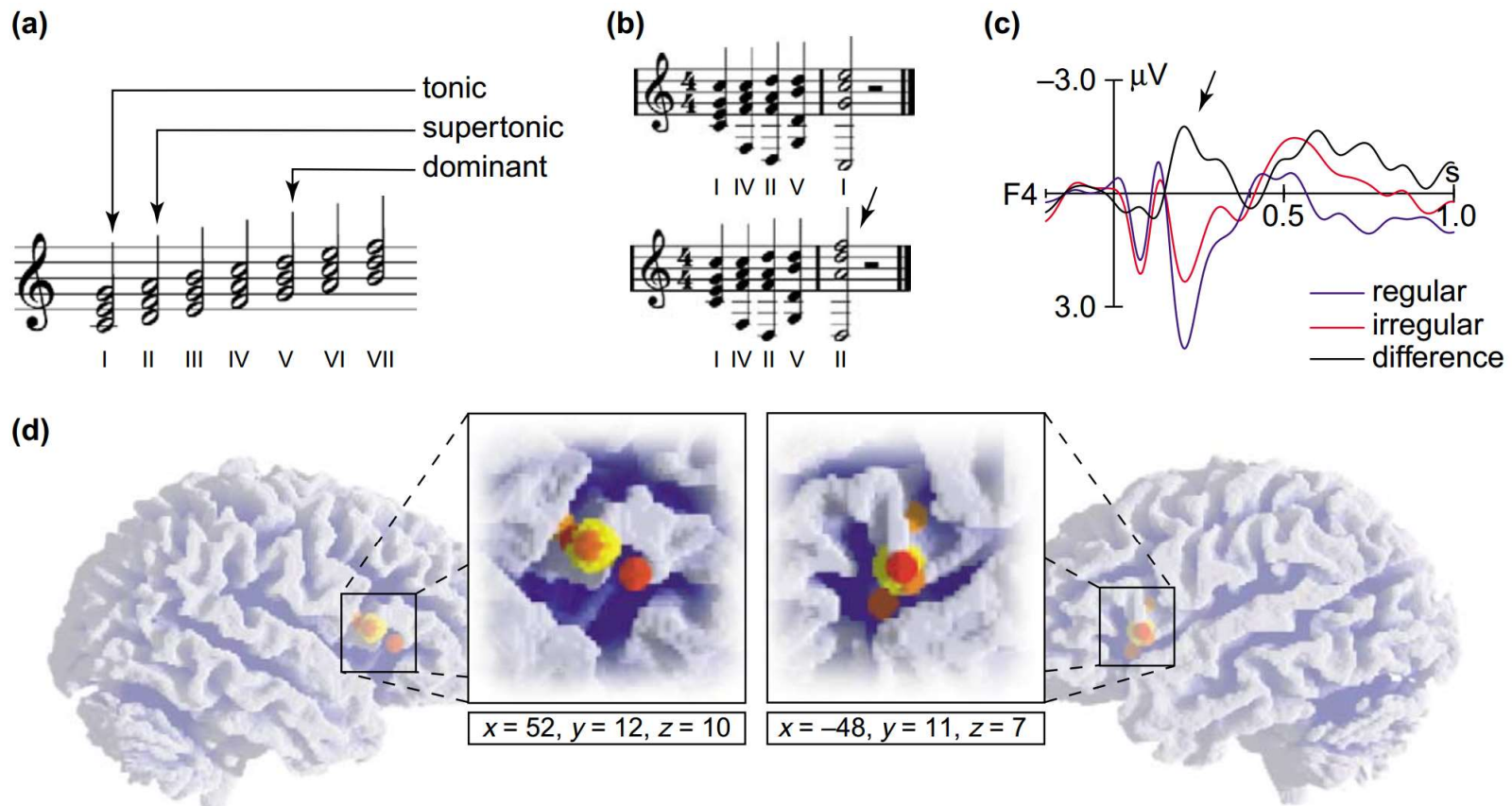
Chez six non-musiciens, les réponses MEG montrent une détection rapide des accords déviants, avec une réponse bilatérale attribuée à la région frontale inférieure.

Revue de la localisation des effets de violation harmonique en IRMf

Koelsch, S. (2011). Toward a neural basis of music perception - a review and updated model. *Frontiers in Psychology*, 2, 110. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00110>

Koelsch, S., & Siebel, W. A. (2005). Towards a neural basis of music perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(12), 578–584. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.10.001>

Koelsch et al. passent en revue les études qui ont utilisé des séquences d'accords dans lesquelles on introduit soudainement un accord de la mauvaise tonalité. D'après lui, on observe systématiquement une réponse de la partie operculaire du cortex frontal inférieur (aire 44) dans les deux hémisphères, mais avec un biais en faveur de l'hémisphère droit. Des réponses sont parfois observées dans la partie antérieure du gyrus temporal supérieur (STG) et dans le cortex prémoteur ventrolatéral (vIPMC).



L'effet d'une violation des dépendances à longue distance en musique

Koelsch, S., Rohrmeier, M., Torrecuso, R., & Jentschke, S. (2013). Processing of hierarchical syntactic structure in music. *PNAS*, 110(38), 15443–15448. <https://doi.org/10.1073/pnas.1300272110>

A Original

B Modified

Koelsch et al. remarquent que toutes les études existantes portent sur des violations **locales** (passage soudain à un accord dans la mauvaise tonalité). Peut-on concevoir des violations à **longue distance** qui mettent spécifiquement à l'épreuve la représentation hiérarchique enchâssée que postule la *GTTM* ?

Utilisation de deux chorales de Bach, de structure ABA:

La première partie démarre avec la tonique (T, sol majeur) mais se termine dans la tonalité de la dominante (D, ré majeur), et cette « tension » n'est pas immédiatement résolue: la mélodie ne reprend pas immédiatement avec la tonique, mais avec une sous-structure intermédiaire dans une autre tonalité (marquée S). Il faut attendre la cadence finale pour revenir à la tonique → structure enchâssée.

Pour créer une violation, la mélodie est transformée en une structure A'BA, en descendant la première partie d'un intervalle d'une quarte.

Ainsi, la seconde partie est rigoureusement identique, mais son accord final ne résout pas la tension créée par la première partie.

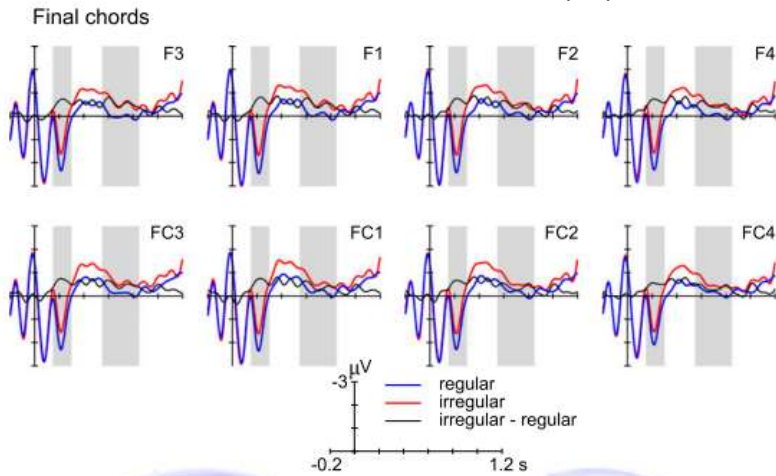
Le morceau modifié comprend en fait deux violations:

- une diminution de la probabilité de transition *locale* entre la fin de la partie A et le début de la partie B,
- mais les auteurs vont surtout s'intéresser à la violation de la dépendance *globale*, c'est-à-dire la réponse cérébrale à l'accord final.

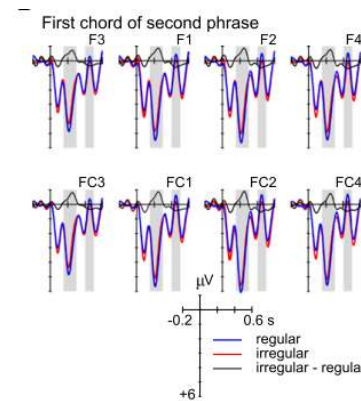
Tâche = non-reliée à l'harmonie: détection d'un changement de timbre.

L'effet d'une violation des dépendances à longue distance en musique

Koelsch, S., Rohrmeier, M., Torrecuso, R., & Jentschke, S. (2013). Processing of hierarchical syntactic structure in music. *PNAS*, 110(38), 15443–15448. <https://doi.org/10.1073/pnas.1300272110>



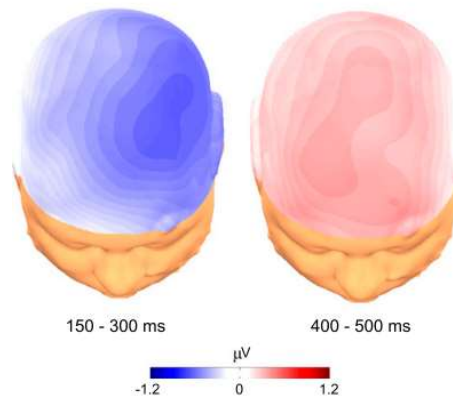
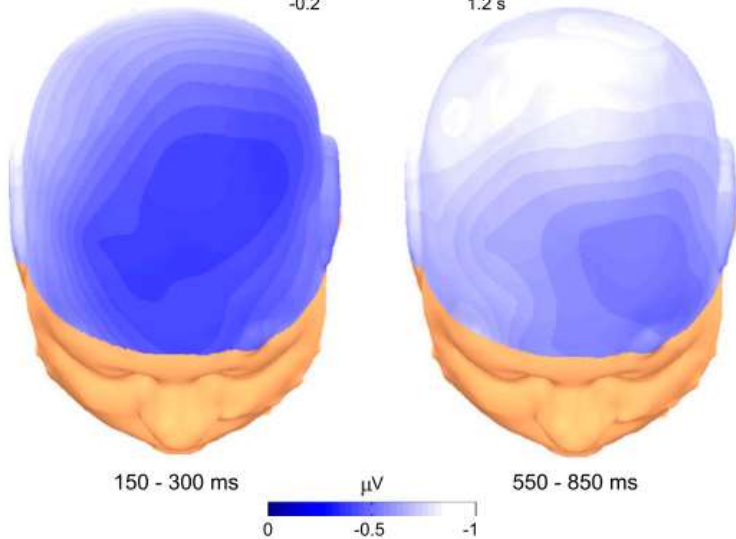
Les musiciens comme les non-musiciens montrent une négativité frontale, légèrement latéralisée à gauche, au moment de l'accord finale. Il y a également un effet au moment de la transition entre partie A et partie B.



Cependant les deux effets semblent indépendants: les accords intermédiaires, qui se succèdent normalement, ne causent pas de réponses cérébrales particulières.

Il y a donc bien deux effets

- Un premier au moment de la violation *locale*
- Un second, prolongé, au moment de la non-résolution finale (dépendance à longue distance).



Une propriété clé de la syntaxe du langage – l'existence de dépendances à longue distance – est donc partagée avec la syntaxe de la musique.

Effet paramétrique de l'organisation syntaxique en musique

Thèse d'Elodie Cauvet, sous la direction de Christophe Pallier



Phrase musicale complète

$\text{♩} = 152$

Original Melody number 1 (M1) = 16 original chunks



Division en 2 parties

Chunks number 1 to 8 from M1 Chunks n. 9 to 16 from M2



Division en 4 parties

1 to 4 from M1 5 to 8 from M2 9 to 12 from M3 13 to 16 from M4



Division en 8 parties

1-2/ M1 3-4/ M2 M3 M4 M5 M6 M7 M8



Division en 16 parties

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16

Les jugements subjectifs et objectifs valident la construction des stimuli

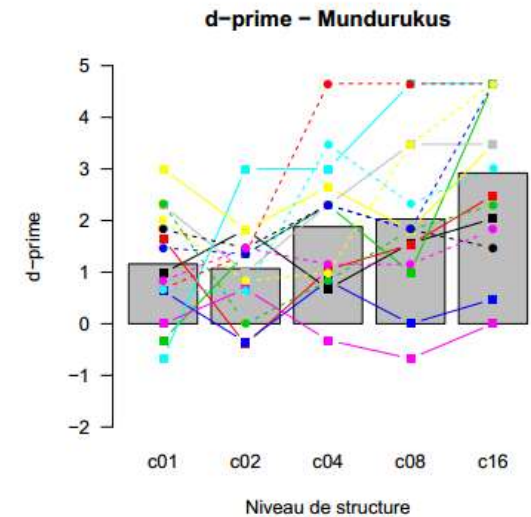
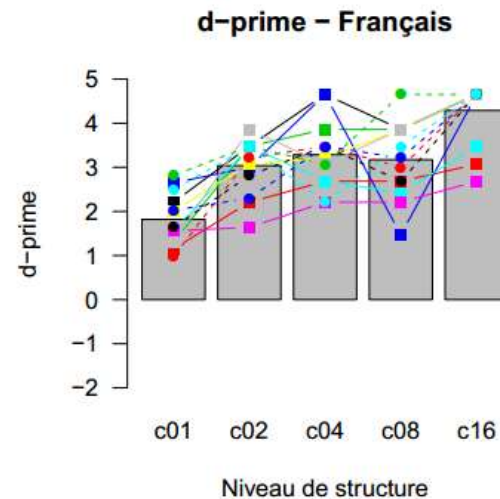
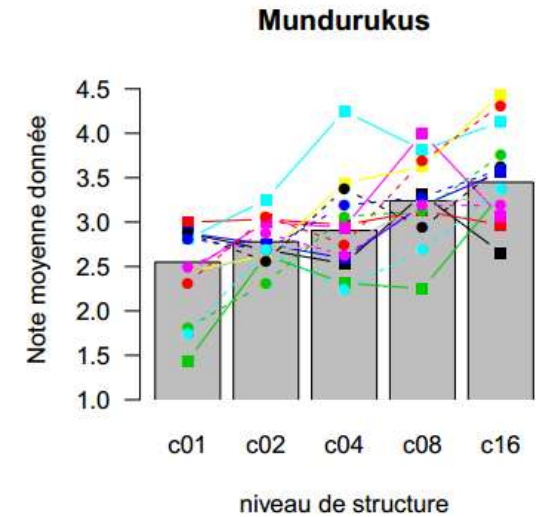
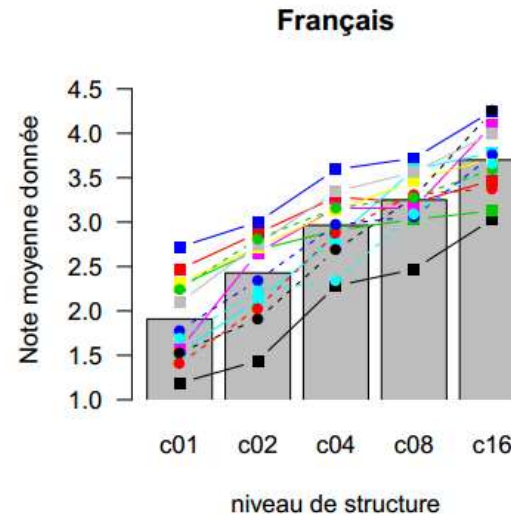
10 participants français, dépourvus d'éducation musicale, ont effectué un "jugement de cohérence", allant de 0 (totalement déstructuré) à 5 (bien structuré).

Les jugements subjectifs sont bien ordonnés en fonction de la quantité de déstructuration imposée aux stimuli (« niveau de structure »)

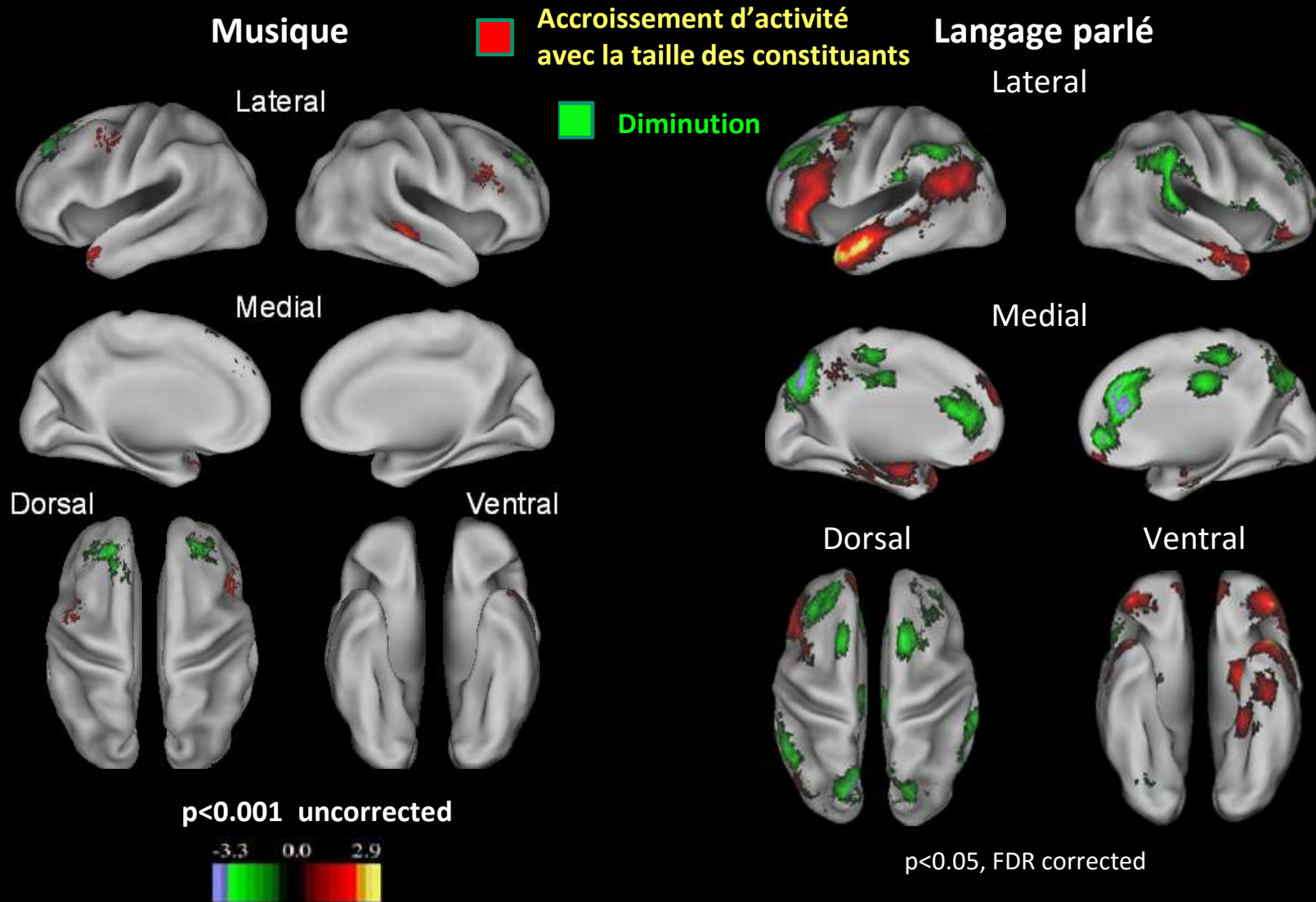
Une tâche objective (pareil/différent) montre également un effet de structure: il est plus facile de porter un jugement lorsque les stimuli sont structurés.

Les mêmes jugements ont été effectués par des indiens Mundurucus (Amazonie, état de Para).

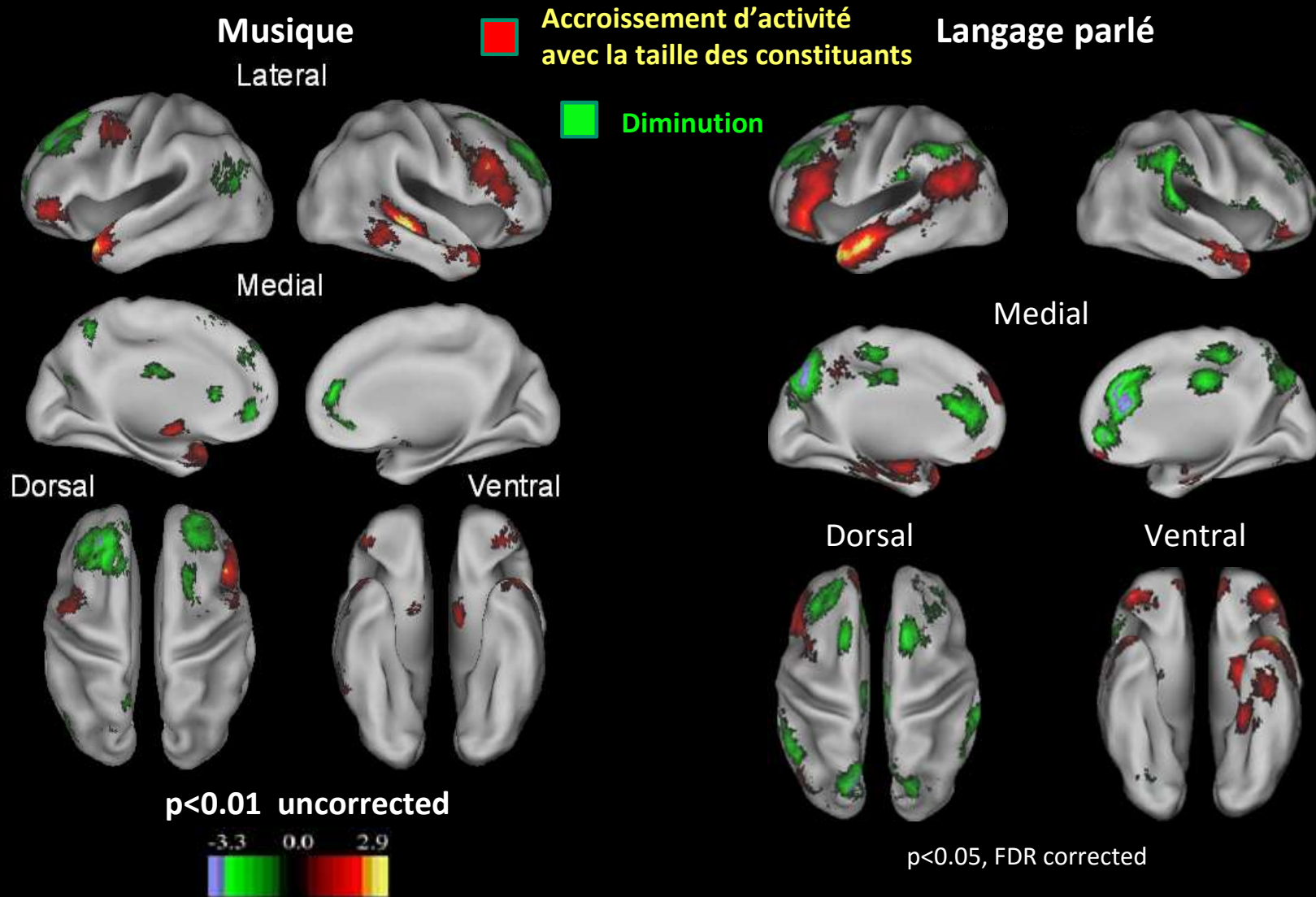
La structure continue d'influencer les jugements subjectifs et objectifs, sans interaction de le cas de la tâche pareil/différent.



Comparaison entre musique et langage chez les mêmes sujets



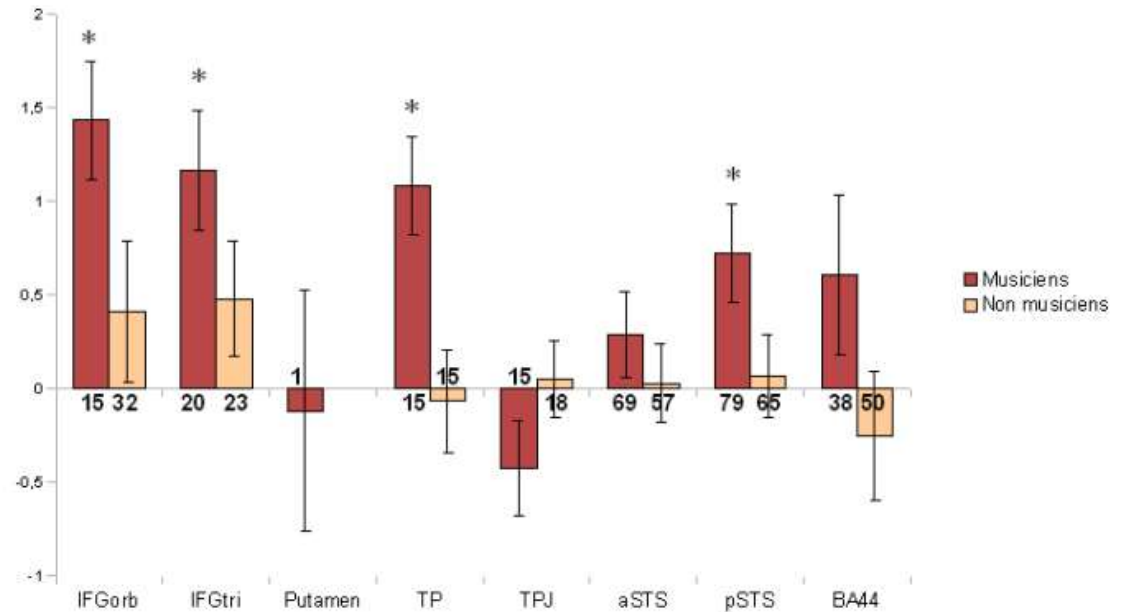
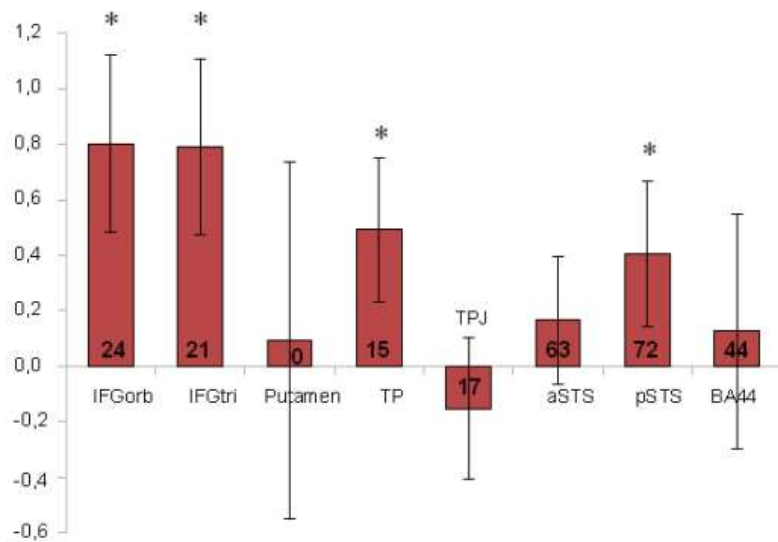
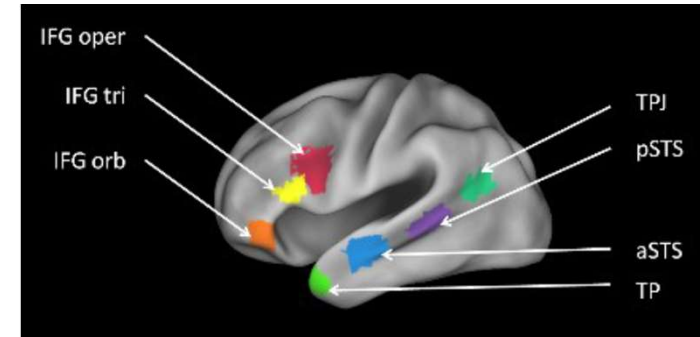
Comparaison entre musique et langage à un seuil plus bas



Les aires du langage sont-elles activées par la musique?

Utilisation d'une approche développée par Ev Fedorenko :

- identification, à l'intérieur de chaque région d'intérêt identifiée dans le paradigme linguistique, des voxels activés pour un sujet donné dans le contraste « langage moins silence »
- Ensuite, examen des réponses aux structures musicales dans ces voxels.

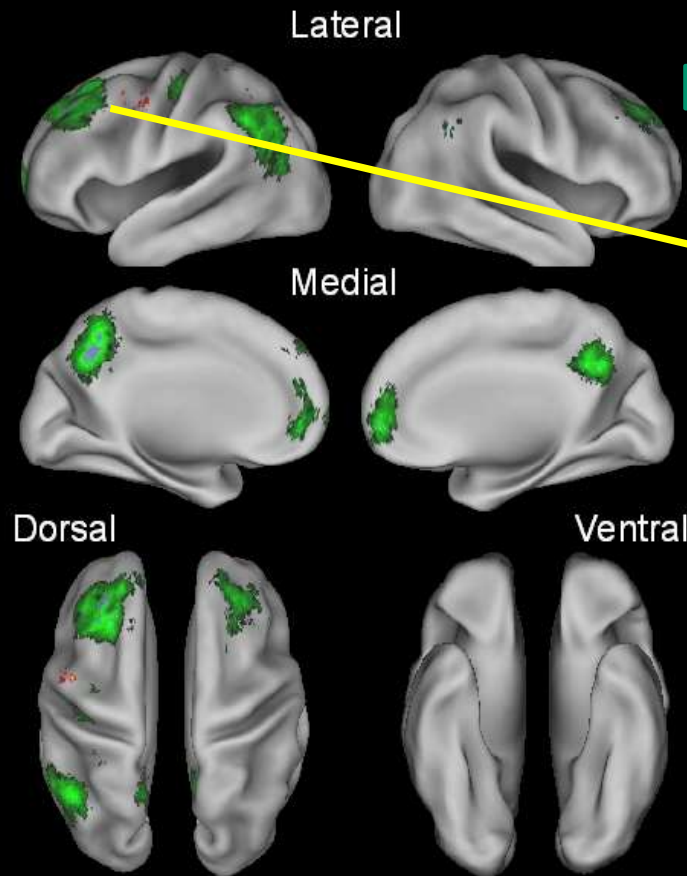


Conclusion:

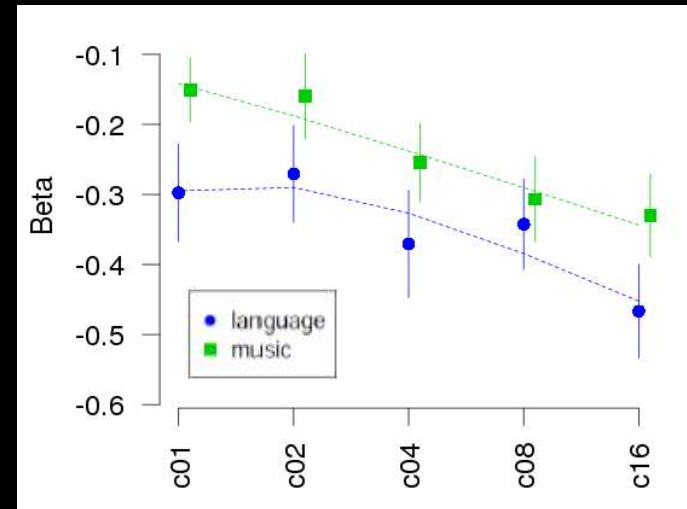
- Il existe une contribution (modeste) des aires du langage à la syntaxe musicale
- Celle-ci n'est retrouvée que chez les musiciens.
- Elle se double d'une activation dans l'hémisphère droit (IFG, STS)

Un effet de complexité inverse dans le cortex préfrontal dorsal

Musiciens seuls



■ Diminution avec la quantité de structure musicale



Ce réseau pourrait-il refléter la recherche systématique d'une structure ?

$p < 0.001$ uncorrected



Structures musicales et structures linguistiques

Fedorenko, E., McDermott, J. H., Norman-Haignere, S., & Kanwisher, N. (2012). Sensitivity to musical structure in the human brain. *Journal of Neurophysiology*, 108(12), 3289–3300. <https://doi.org/10.1152/jn.00209.2012>

Manipulation de la structure musicale:

Partant d'un morceau de pop/rock, on détruit soit la mélodie (en ajoutant de -3 à +3 demitons à chaque note), soit le rythme (en déplaçant le début de chaque note d'une durée allant jusqu'à un temps), soit les deux (*scrambled*).

IRM fonctionnelle chez 12 sujets dépourvus d'éducation musicale intense (pas plus d'un an).

Réponses du cortex frontal inférieur droit, et de régions temporales bilatérales.

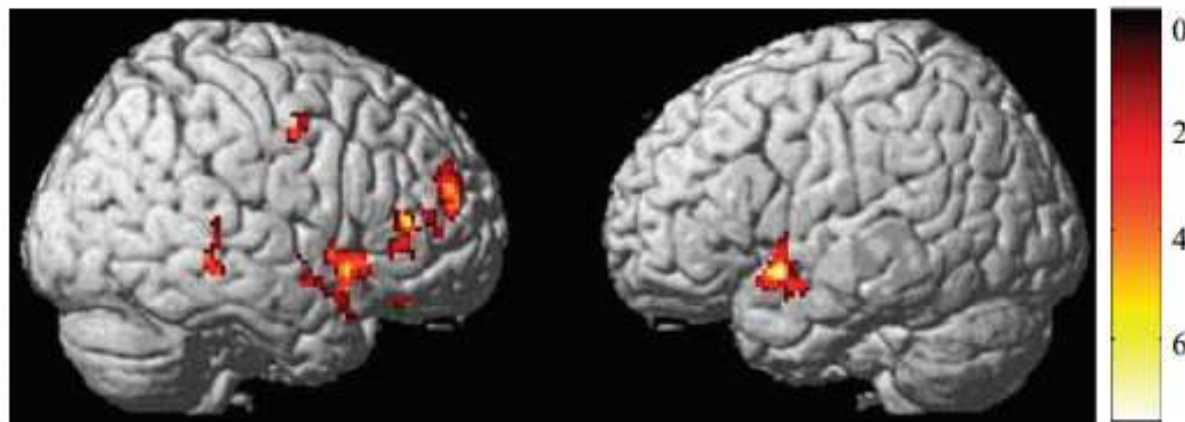
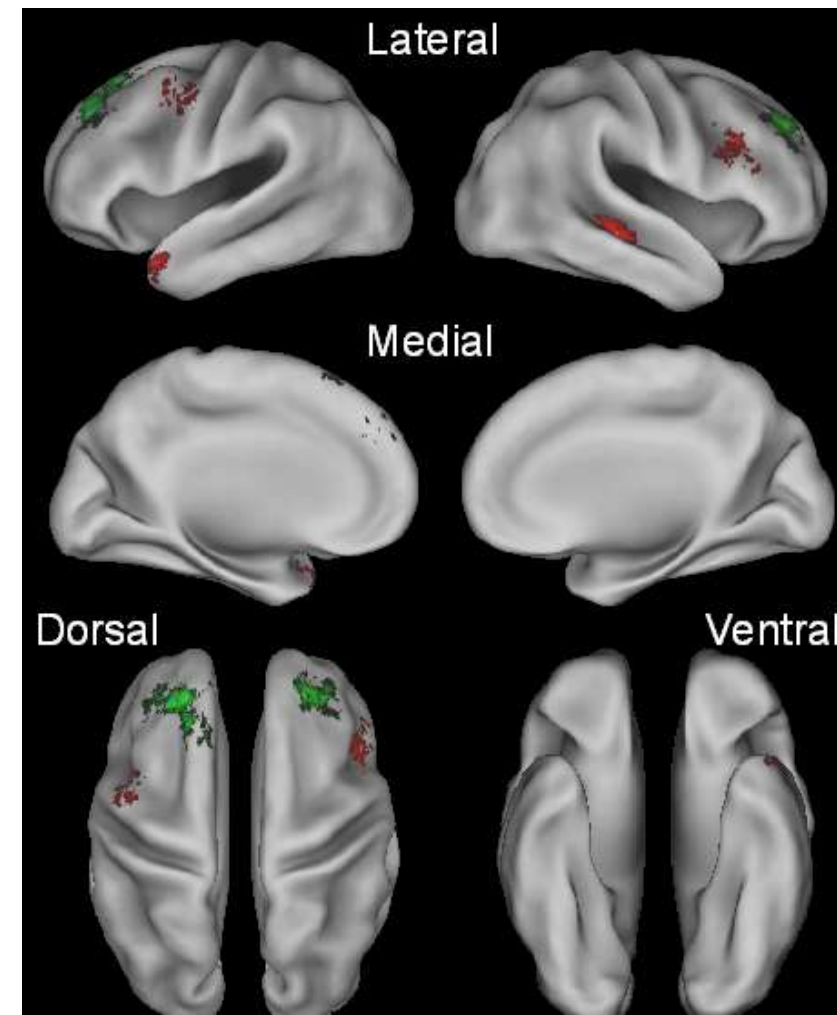


Fig. 6. Activation map from the random effects analysis for the Intact Music > Scrambled Music contrast (thresholded at $P < 0.001$, uncorrected) projected onto the single-subject template brain in SPM (single_subj_T1.img).



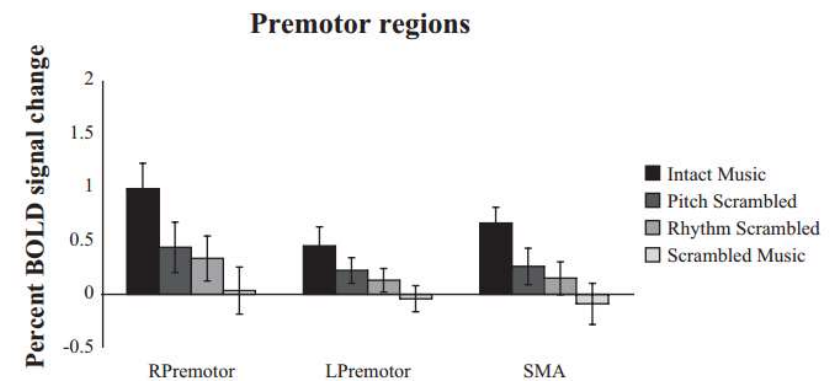
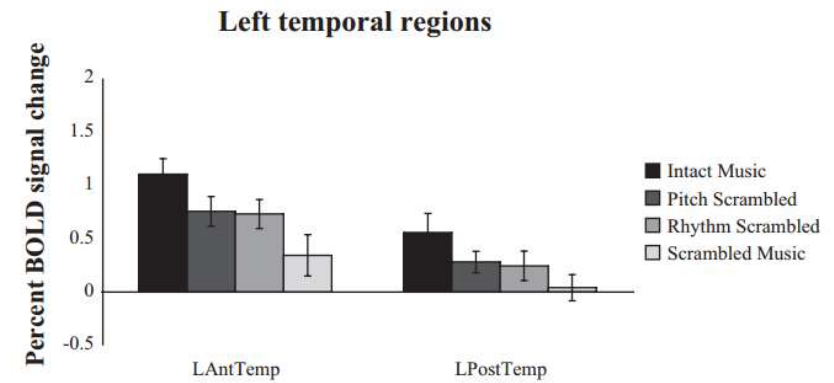
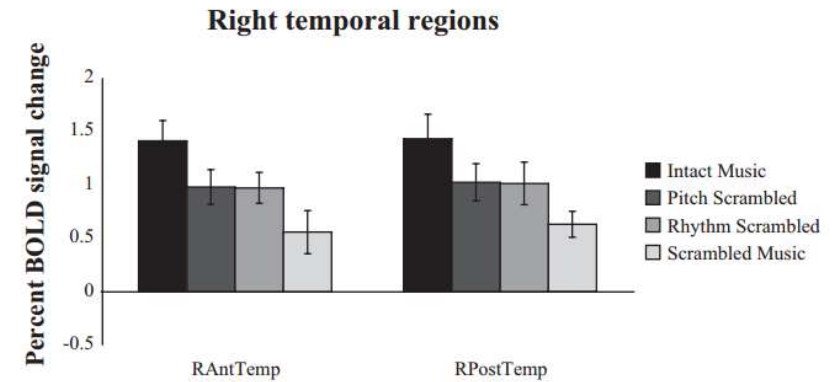
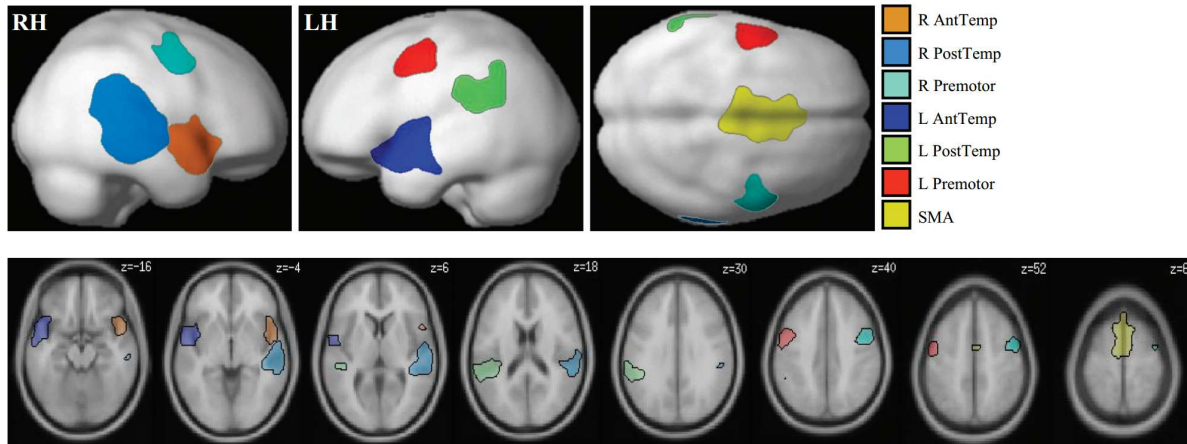
Structures musicales et structures linguistiques

Fedorenko, E., McDermott, J. H., Norman-Haignere, S., & Kanwisher, N. (2012). Sensitivity to musical structure in the human brain. *Journal of Neurophysiology*, 108(12), 3289–3300. <https://doi.org/10.1152/jn.00209.2012>

Identification de 7 « parcelles » où les sujets montrent des réponses systématiques à la structure musicale (intact>scrambled, $p < 0.01$):

Dans ces régions, le rythme et la mélodie semblent avoir des effets additifs et similaires.

(une recherche au niveau du cerveau entier ne révèle pas de régions spécialisées pour l'une ou pour l'autre).



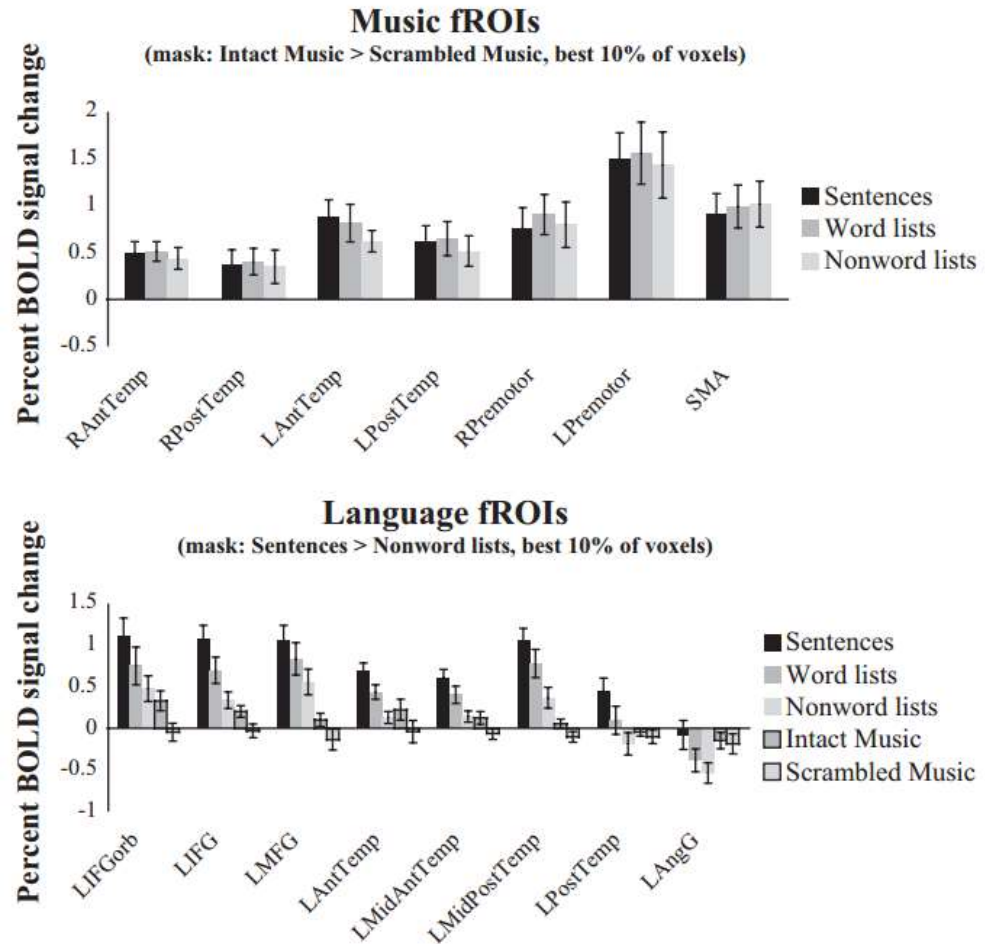
Structures musicales et structures linguistiques

Fedorenko, E., McDermott, J. H., Norman-Haignere, S., & Kanwisher, N. (2012). Sensitivity to musical structure in the human brain. *Journal of Neurophysiology*, 108(12), 3289–3300.
<https://doi.org/10.1152/jn.00209.2012>

Les mêmes sujets ont été exposés à des structures linguistiques: phrases, listes de mots, listes de non-mots.

Aucune des régions sensibles aux structures musicales ne répond aux structures linguistiques!

Inversement, il existe bien des régions (classiques, dans l'hémisphère gauche) qui répondent aux structures linguistiques, mais ces régions répondent très peu à la musique (aucun effet ne survit à une correction pour comparaisons multiples; à $p < .05$ non corrigé, un petit effet existe dans LIFGorb, LIFG, LMFG, LAntTemp, LMidAntTemp, LMidPostTemp, LPostTemp, et LAngG).



Interférences: La syntaxe musicale interfère-t-elle avec la syntaxe du langage?

Fedorenko, E., Patel, A., Casasanto, D., Winawer, J., & Gibson, E. (2009). Structural integration in language and music: Evidence for a shared system. *Memory & Cognition*, 37(1), 1–9. <http://doi.org/10.3758/MC.37.1.1>

Test comportemental de l'hypothèse d'une ressource syntaxique partagée (Patel).

Tâche = lire la phrase, un syntagme après l'autre (appui sur la barre espace), puis répondre à des questions sur leur contenu.

- Manipulation de la complexité syntaxique du langage:

Relative-sujet: The boy that helped the girl got an "A" on the test

Relative-objet: The boy that the girl helped got an "A" on the test

Simultanément, le lecteur entend une mélodie avec une manipulation de la distance harmonique : Une note critique est présentée, soit dans la tonalité, soit hors de la tonalité de la mélodie.

+ manipulation de la surprise non-syntaxique (note jouée trop fort)

Résultats:

Les sujets ont moins bien compris les phrases lorsque, au moment critique (trace du mouvement syntaxique), ils étaient distraits par une violation de la syntaxe musicale.

Ce résultat semble spécifique à la syntaxe, dans la mesure où aucun effet n'est observé lorsque la surprise est induite par un changement de volume sonore.

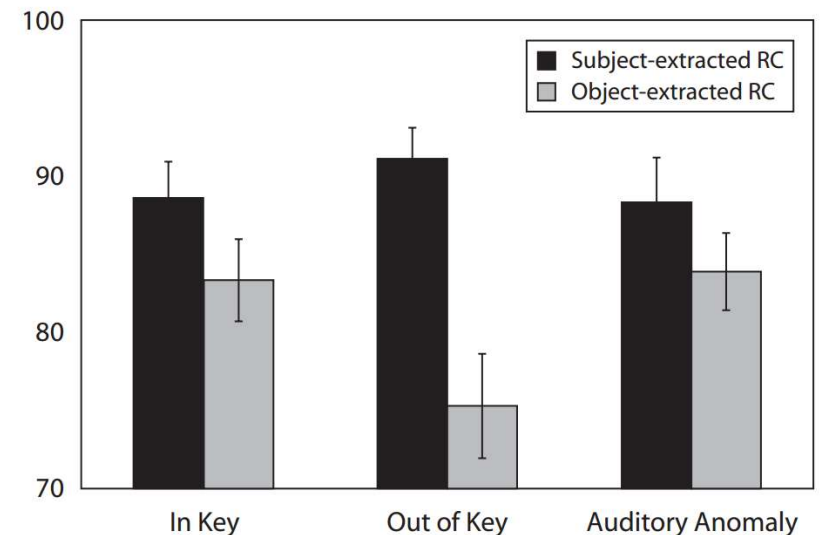
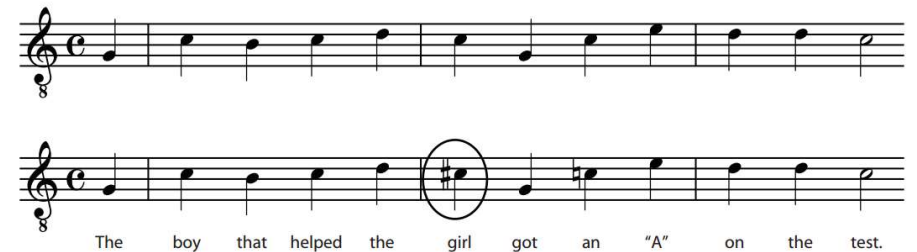


Figure 3. Comprehension accuracies in the six conditions of the experiment. Error bars represent standard errors of the mean.

Collision entre une violation de la syntaxe musicale et une augmentation de la complexité de traitement d'une phrase

Slevc, L. R., Rosenberg, J. C., & Patel, A. D. (2009). Making psycholinguistics musical: self-paced reading time evidence for shared processing of linguistic and musical syntax. *Psychon Bull Rev*, 16(2), 374–81.

Lecture d'une phrase qui induit en erreur (*garden-path*), avec un mot critique qui exige soudain une réanalyse **syntactique**.

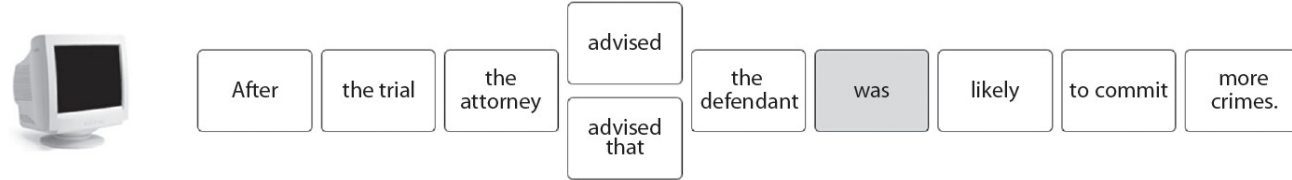
Comparaison avec une condition **sémantique**, où le mot critique viole ou ne viole pas les attentes.

Le temps de lecture de chaque mot est mesurée (*self-paced reading*).

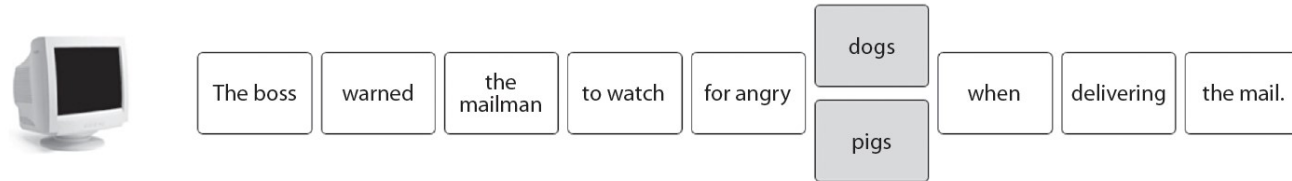
Simultanément, le lecteur entend une mélodie avec une manipulation de la distance harmonique : un accord est présenté, soit dans la tonalité, soit hors de la tonalité des accords précédents.

Linguistic Expectancy Manipulations: Syntactic or Semantic

- *Syntactic* expectancy manipulation



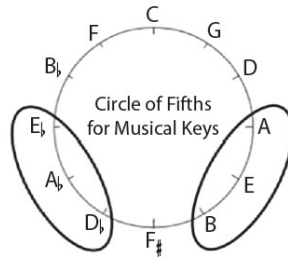
- *Semantic* expectancy manipulation



Musical Syntactic Manipulation (Harmonic Expectancy):



The chord played during the critical region was in key or out of key.



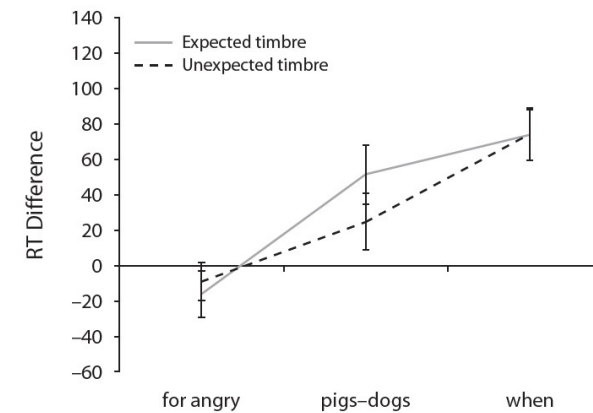
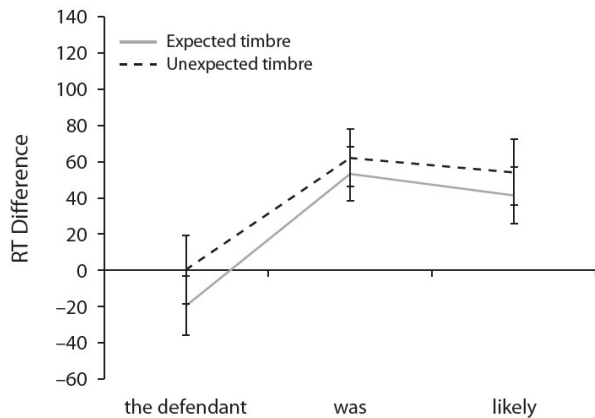
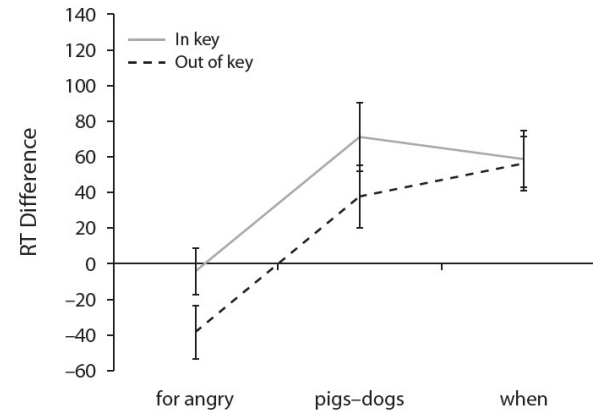
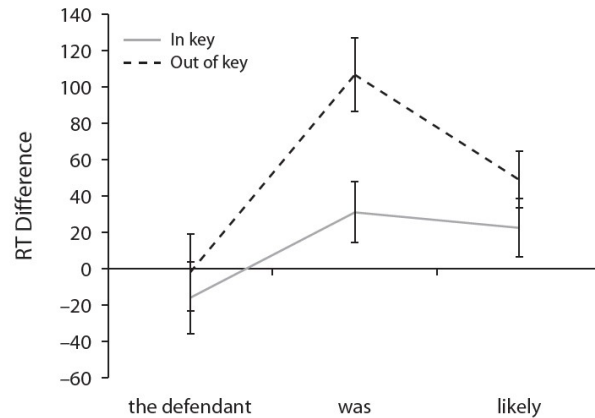
- *In-Key* Chords: All in the key of C
- *Out-of-Key* Chords: 3, 4, or 5 steps away on the circle of fifths



On observe un ralentissement de la lecture spécifiquement à la position difficile, et uniquement lorsque l'accord entendu simultanément n'est pas dans la tonalité attendue.

Pas d'effet sur une violation sémantique... ni lorsque c'est le timbre qui est inattendu.

Conclusion: interaction entre les structures *syntaxiques* du langage et de la musique

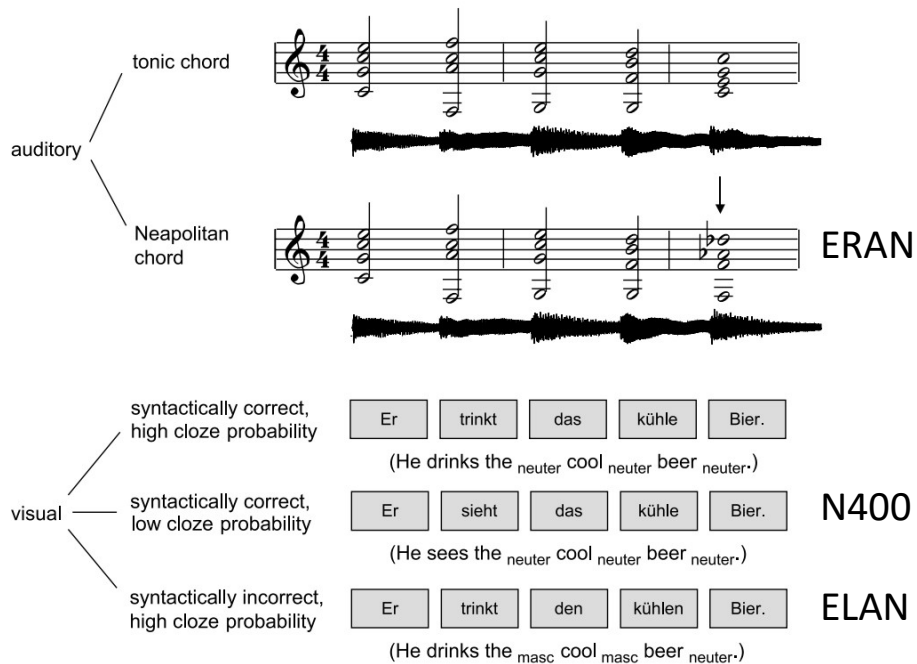


Mais.... Pas répliqué par Perruchet, P., & Poulin-Charronnat, B. (2013). Challenging prior evidence for a shared syntactic processor for language and music. *Psychonomic Bulletin & Review*, 20(2), 310–317 --- ces auteurs suggèrent que la ré-analyse sémantique a exactement le même effet.

Collision entre les violations syntaxiques en langage et en musique

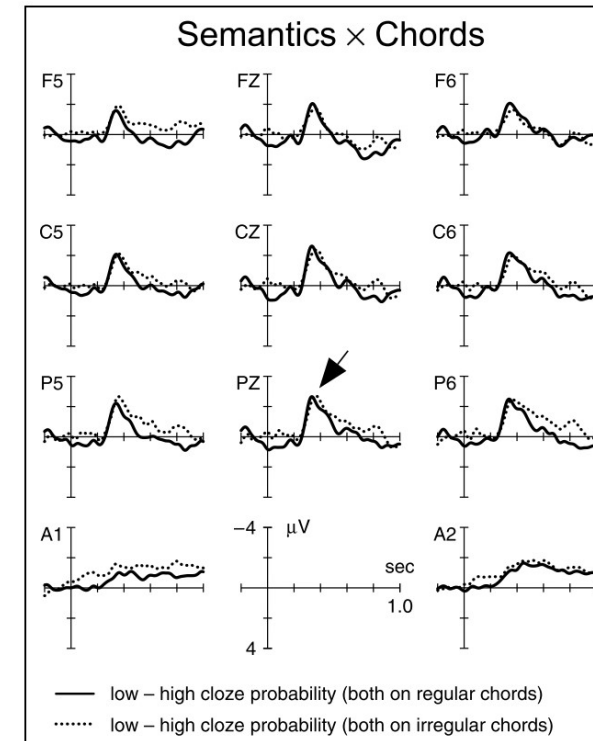
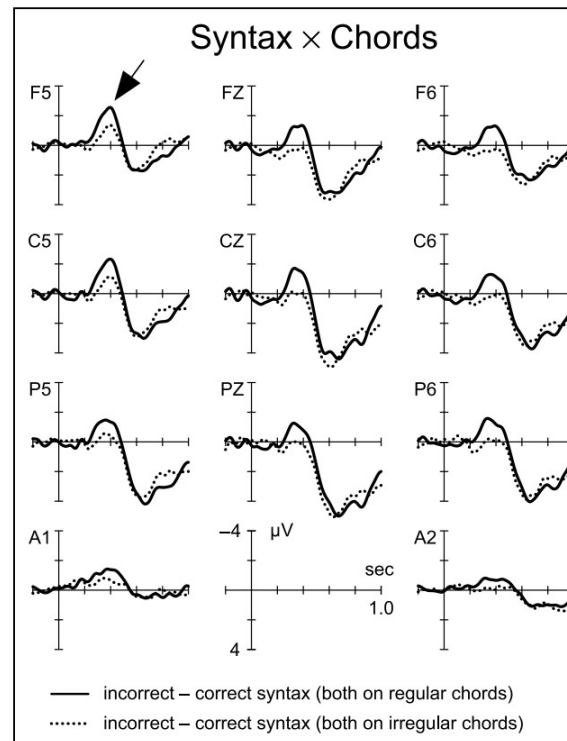
Koelsch, S., Gunter, T. C., Wittfoth, M., & Sammler, D. (2005). Interaction between syntax processing in language and in music: an ERP Study. *J Cogn Neurosci*, 17(10), 1565–77.

Collision entre des violations musicales (harmoniques) linguistiques (syntaxiques ou sémantiques, en lecture).



L'onde ELAN est fortement réduite en présence d'une violation musicale.

L'onde N400 n'est pas affectée.



Expérience 2: Ces effets sont spécifiques de la syntaxe musicale, ils n'existent pas lorsque la violation auditive est évoquée par l'écoute d'une hauteur tonale inattendue, qui engendre une MMN.

Langage et musique: Conclusions

Au niveau auditif, langage et musique sont rapidement séparés et traités dans des régions distinctes du lobe temporal.

Au niveau syntaxique, il existe un début de preuve de l'existence de structures syntaxiques en musique, avec des parallèles plus au moins convaincants avec les structures linguistiques.

- Structure **rythmique** (« prosodie »)
- Structure **harmonique** (« syntaxe »)

La **violation** de ces structures entraîne l'activation de la région frontale inférieure (IFG) dans les deux hémisphères

- sans qu'on sache s'il s'agit exactement de la même région que lors d'une violation de la syntaxe du langage.
- Mais avec des interférences entre ces deux sortes de violations, qui sont compatibles avec l'hypothèse d'une ressource partagée (Patel)

La **modulation de la quantité de structure** en musique fait également apparaître des effets dans l'IFG, mais surtout à droite, et pas nécessairement dans les mêmes régions exactes que celles activées par le langage.

Le plus probable est qu'il existe **des circuits dissociables, mais qui se recouvrent partiellement.**