

Cours 2016-2017:

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



**La représentation des arbres syntaxiques,
singularité de l'espèce humaine ?**



Fresque de Marietta Ren (mariettaren.com)

Les langages du cerveau

L'espèce humaine possède de multiples langages :

Langage parlé ou écrit

Langage musical

Langage mathématique

Et encore... :

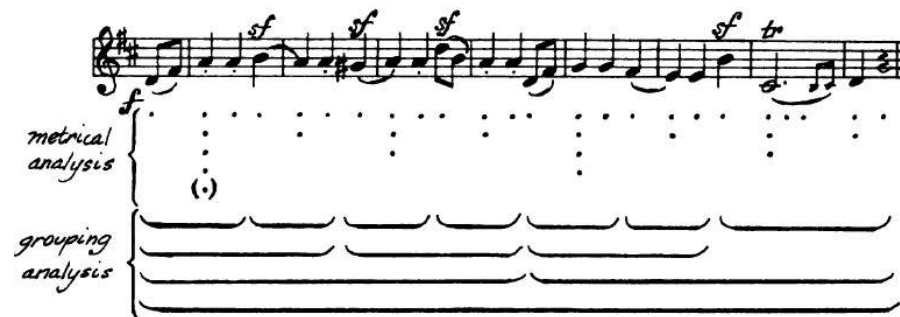
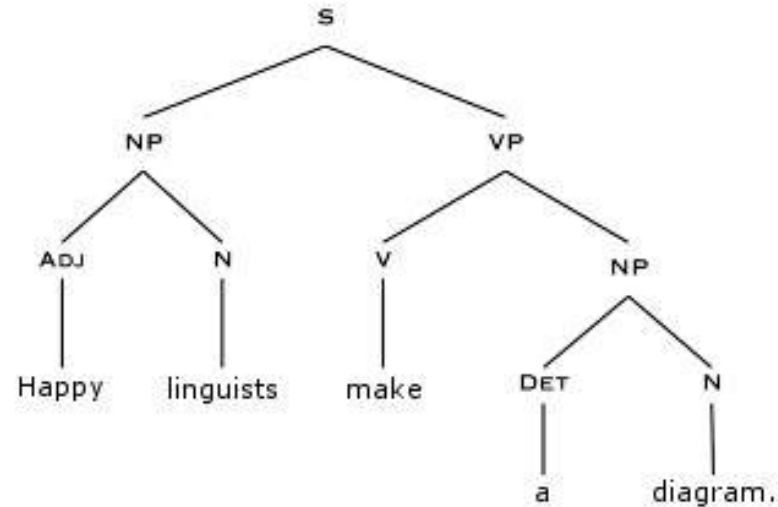
Langage de l'action (outils)

Langage de la cognition sociale

Langages informatiques

Dans tous ces domaines, l'espèce humaine se caractérise par une capacité singulière de créer et de manipuler des structures symboliques enchâssées.

L'évolution a-t-elle doté le cerveau humain de mécanismes singuliers de représentation des arbres symboliques?



$$\frac{1}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{9801} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(4k)! (1103 + 26390k)}{(k!)^4 396^{4k}}$$

La récursion : noyau de la faculté de langage ?

Hauser, M. D., Chomsky, N., & Fitch, W. T. (2002). The faculty of language: what is it, who has it, and how did it evolve? *Science*, 298(5598), 1569–79. <https://doi.org/10.1126/science.298.5598.1569>

« La **faculté de langage au sens large** inclut un système sensori-moteur, un système conceptuel-intentionnel, et les mécanismes computationnels de récursion, qui introduisent la capacité de générer une infinité d'expressions à partir d'un ensemble fini. Nous supposons que la **faculté de langage au sens étroit du terme** se réduit à la récursion, et qu'elle est la seule composante de la faculté de langage qui soit propre à l'espèce humaine ».

Exemples:

- factory, car factory, car factory worker, car factory worker union...
- Ambiguïté: black (taxi driver) vs (black taxi) driver
- Believe, believable, unbelievable...
- Ambiguïté: unlockable = (unlock)able or un(lockable)

Toutes les langues humaines seraient fondées sur des enchâssements récursifs.

Nevins, A., Pesetsky, D., & Rodrigues, C. (2009). Pirahã Exceptionality: A Reassessment. *Language*, 85(2), 355–404. <https://doi.org/10.1353/lan.0.0107>

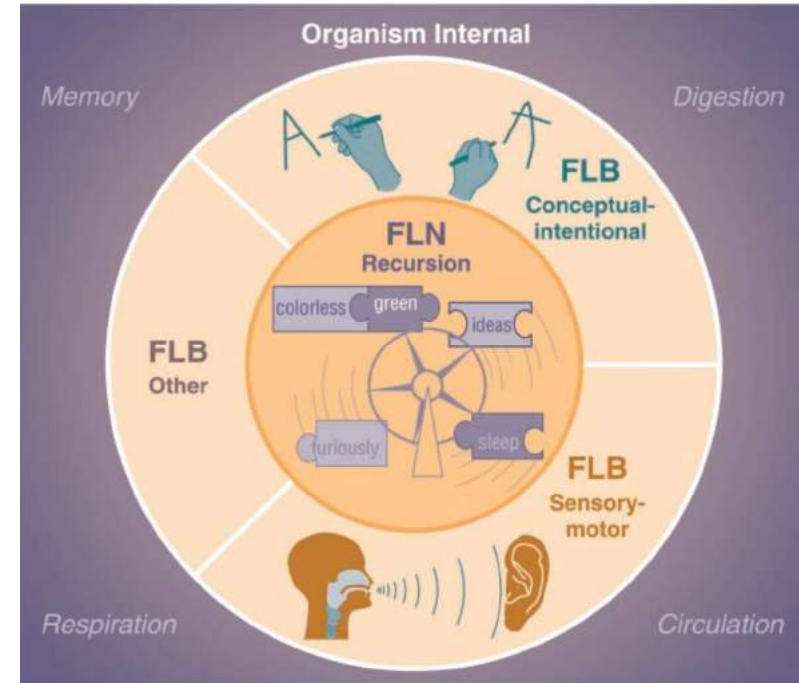
Controverse sur la langue et la culture Pirahã, présentés par Dan Everett comme une exception radicale, fondée sur la culture du présent, et dépourvu de récursion. Mais...

- Le pirahã semble utiliser des possessifs enchâssés: « Kapoogo's canoe's motor is big" (Salles, 2015)
- Présence de phrases comme: ti xibi 'ib-i-hiab-iig-a ' kaha' ' kai-sai

1 order-EP-NEG-CONT-REM arrow make-NOMLZR

que Everett lui-même traduit comme 'Je ne t'ordonne pas de fabriquer une flèche.'

La négation s'applique à l'ensemble de la proposition. Une simple juxtaposition de propositions, comme le propose Everett, ne fonctionne pas: « Je ne t'ordonne pas. Fais une flèche! ».



Tecumseh Fitch et l'hypothèse de la « dendrophilie »

Fitch, W. T. (2014). Toward a computational framework for cognitive biology: unifying approaches from cognitive neuroscience and comparative cognition. *Physics of Life Reviews*, 11(3), 329–364. <https://doi.org/10.1016/j.plrev.2014.04.005>



« Plusieurs expériences suggèrent qu'il existe une **différence importante entre les humains et la plupart des autres espèces**, qui se caractérise sur le plan cognitif par une propension de notre espèce à inférer des structures en arbres à partir de données séquentielles. »

Fitch s'appuie notamment sur le « projet Grammarama » développé par George Miller qui concluait que « dès qu'on leur présente un ensemble de séquences, les humains ont à la fois la capacité et la propension à en inférer, dès que possible, des structures hiérarchiques. »

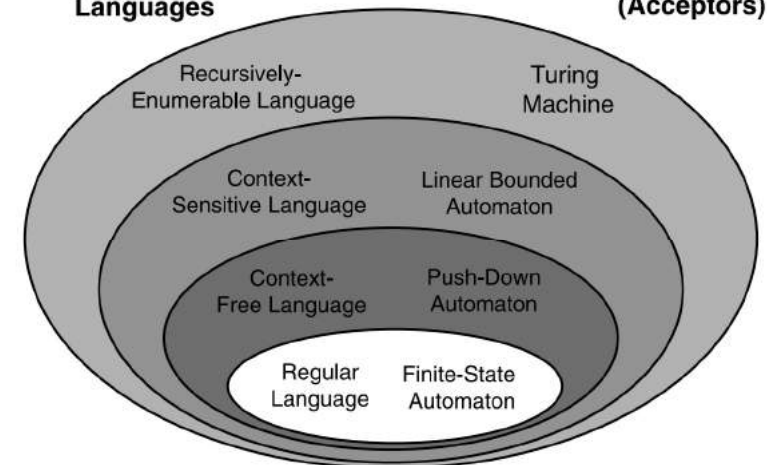
« Sur le plan computationnel, cette compétence implique des capacités génératives qui vont au-delà du niveau des langages rationnels (à états finis) » → langage non-contextuel.

« Sur le plan de l'implémentation, elle requiert l'équivalent neural d'une pile (*push-down stack*). » (on parle d'« automate à pile »).

« J'appelle cette singulière propension humaine **dendrophilie** ».

Grammars (Generators) & Languages

Automata (Acceptors)



The Formal Language Hierarchy

Règles de substitution:

Par exemple: $NP \rightarrow A NP$ et $NP \rightarrow NP N$

« Black taxi driver » = $[A [N N]]$ ou $[[A N] N]$.



Marc Hauser et l'hypothèse d'une « faculté générative universelle »

Hauser, M. D., & Watumull, J. (2016). The Universal Generative Faculty: The source of our expressive power in language, mathematics, morality, and music. *Journal of Neurolinguistics*. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2016.10.005>

La récursion est-elle une adaptation à la communication, restreinte à la faculté de langage?
Ou bien s'agit-il d'une exaptation, qui dans le cerveau humain, s'applique à de nombreux domaines?
Marc Hauser et Jeffrey Watumull font l'hypothèse que l'espèce humaine se caractérise par une « **faculté générative universelle** » (*Universal Grammar Faculty*).

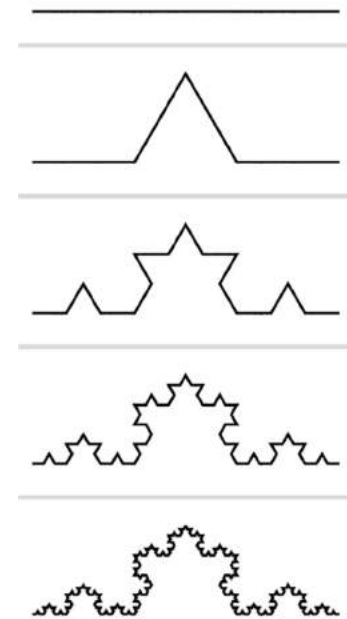
« [cette faculté] et ses interfaces vers les différents domaines de connaissance permettent d'engendrer des structures hiérarchiques (en réalité fractales), *ad infinitum*, lesquelles représentations sont ensuite « exaptées » pour le langage, les mathématiques, la musique, et le sens moral.

Ces différents domaines ne diffèrent que dans les valeurs (mots, nombres, notes, événements) qui se substituent aux variables dans les procédures génératives. »

- Le cerveau humain serait doté d'une sorte de « langage de l'esprit » encore mal compris, fondé sur des arbres binaires et des enchâssements de prédicats.
- Langage de la géométrie (nos propres travaux avec Marie Amalric, Liping Wang, Santi Figueira et Mariano Sigman)
- Langage de la musique (David Pesetsky)

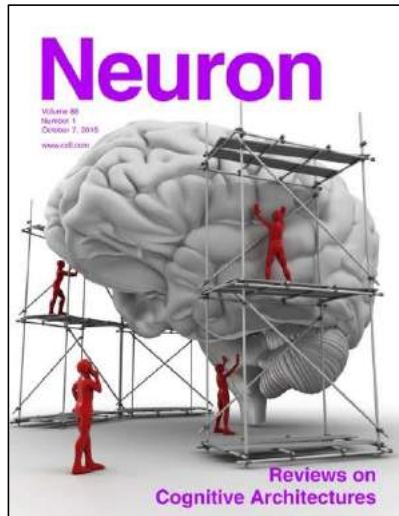
Singularité de l'espèce humaine: « Dans la plupart du monde animal, même lorsqu'il existe quelques preuves de l'existence de procédures génératives du niveau des langages réguliers (le plus bas niveau de la hiérarchie de Chomsky), rien ne prouve que ces procédures sous-tendent à la fois la reconnaissance et la production [de séquences] dans plusieurs domaines. »

- Les humains seraient les seuls à posséder des **modèles génératifs récursifs** communs à plusieurs domaines de connaissances (idée également développée par Josh Tenenbaum dans la perspective du cerveau Bayésien)

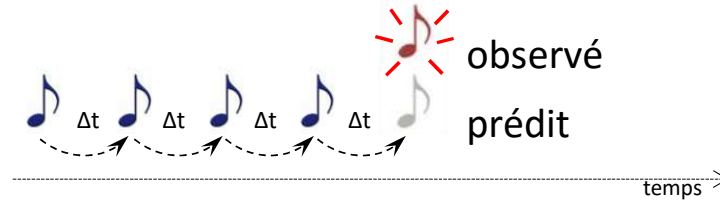


Cinq formes de représentations mentales des séquences

Dehaene, S., Meyniel, F., Wacongne, C., Wang, L., & Pallier, C. (2015). The Neural Representation of Sequences: From Transition Probabilities to Algebraic Patterns and Linguistic Trees. *Neuron*, 88(1), 2–19.



Chaînes temporelles
(*Transitions and timing*)



Formation de groupes
(*Chunking*)

tokibugikobagopilagikobatokibugopila ...

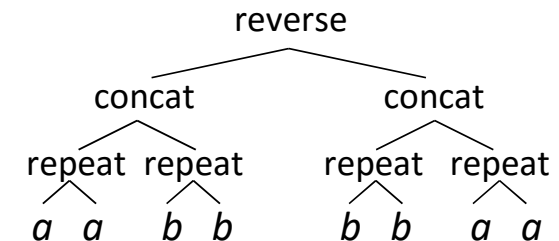
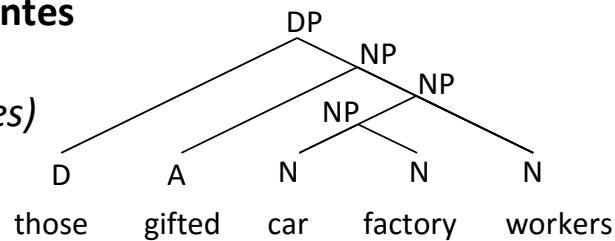
Codage de l'ordre
(*Ordinal knowledge*)



Schémas algébriques
(*Algebraic patterns*)

A A B A A B A A B A B A (violation)
totobu ... mimitu ... gagari ... pesipe ...

**Structures arborescentes
enchâssées**
(*nested tree structures*)



Quelles prédictions pour les mécanismes neuronaux des langages du cerveau?

Fitch, W. T. (2014). Toward a computational framework for cognitive biology: unifying approaches from cognitive neuroscience and comparative cognition. *Physics of Life Reviews*, 11(3), 329–364. <https://doi.org/10.1016/j.plrev.2014.04.005>

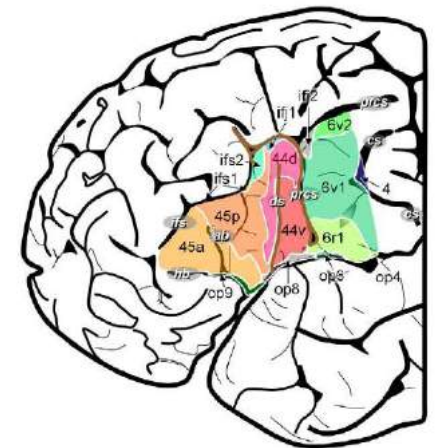
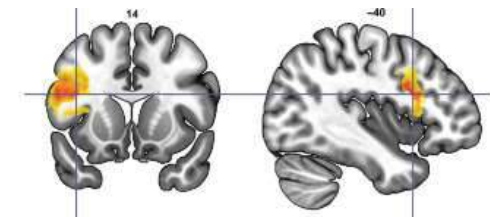
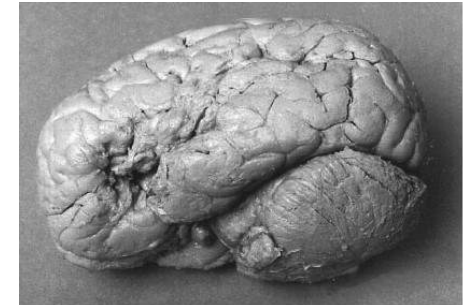
Tecumseh Fitch postule que la région de Broca (frontale inférieure gauche) jouerait le rôle de la « pile » (au sens informatique du terme) requise par les grammaires « context-free » :

« En complément de la machinerie de prédiction hiérarchique, implémentée de façon locale dans tous les cortex sensoriels, les aires postérieures connectées au gyrus frontal inférieur (IFG) disposeraient [chez l'homme] d'un mécanisme supplémentaire de stockage au sein duquel les résultats intermédiaires (et, en particulier, les calculs structurels non terminés) pourraient être placés et récupérés plus tard. »

« Cette vision de l'IFG comme une pile suggère que les représentations structurelles ne surviennent pas dans la région de Broca en soi, mais plutôt qu'un aspect crucial de leur calcul (le stockage de résultats intermédiaires dans une pile) est effectué par un réseau dont l'aire de Broca est un élément important. »

→ Plusieurs questions fondamentales, qui sont autant de prédictions à tester:

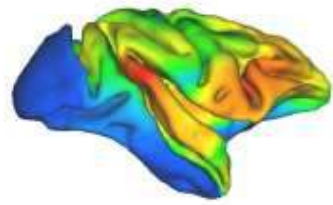
- l'aire de Broca est-elle développée de façon particulièrement singulière dans l'espèce humaine?
- Effectue-t-elle des calculs uniques à notre espèce?
- Intervient-elle dans *tous* les aspects de la cognition qui semblent développés de façon prépondérante dans notre espèce: langage, mais aussi mathématiques, musique, etc?



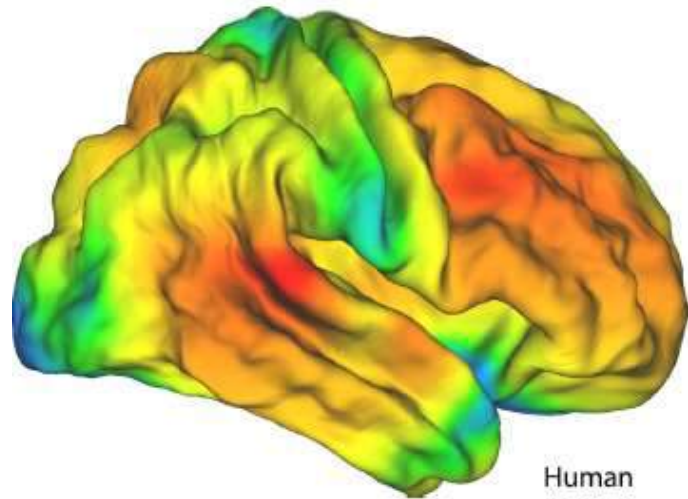
Anatomie: expansion sélective du cortex préfrontal et de l'aire de Broca chez l'homme

Cortical expansion maps

(Chaplin et al., Cerebral Cortex 2013)



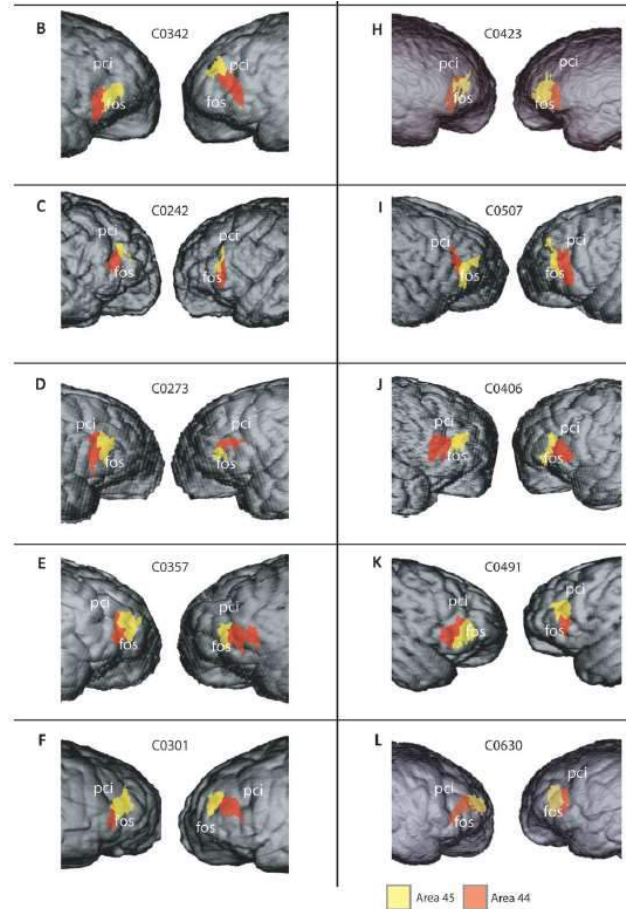
Macaque



Human



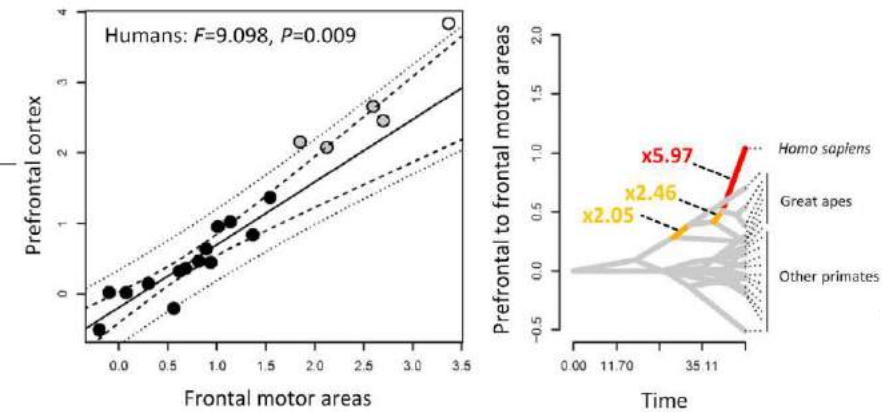
Schenker et al, with Sherwood. Cerebral Cortex 2011



Area 45 Area 44

Identification cyto-architectonique post-mortem des aires 44 et 45 chez 12 chimpanzés. Ces aires sont bien présentes, à des positions comparables à celles du cerveau humain. Aucune asymétrie systématique. Dans l'hémisphère gauche, ces régions sont respectivement 6.6 fois et 6.0 fois plus grandes chez l'homme que chez le chimpanzé (alors que la différence générale de taille n'est que d'un facteur 3.5, et 1.8 dans l'aire visuelle primaire).

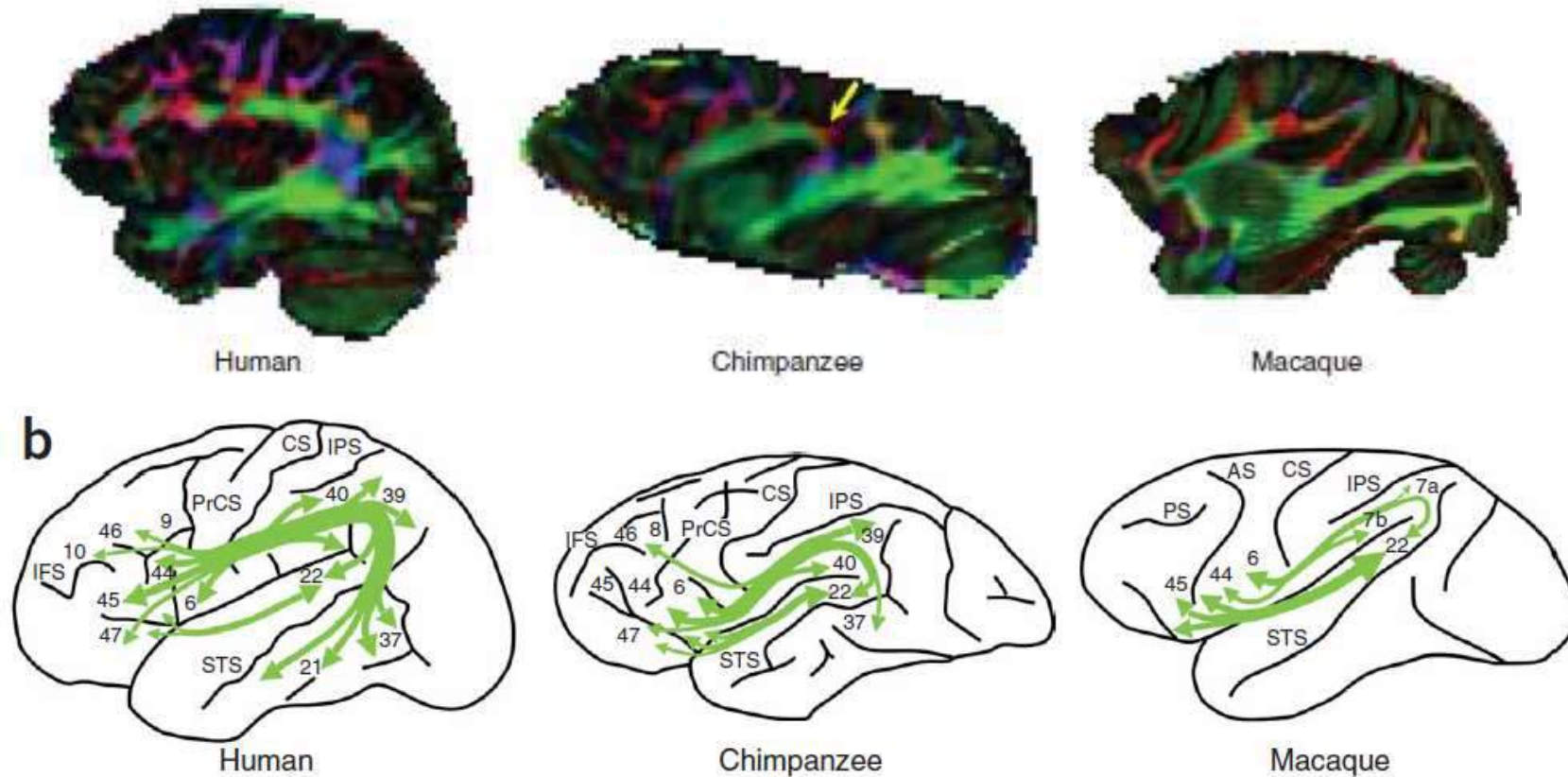
Simple relation allométrique? Non.



Smaers et al., with Sherwood. Current Biology 2017

Connectivité: La projection du faisceau arqué en direction du lobe temporal est particulièrement développée chez l'homme.

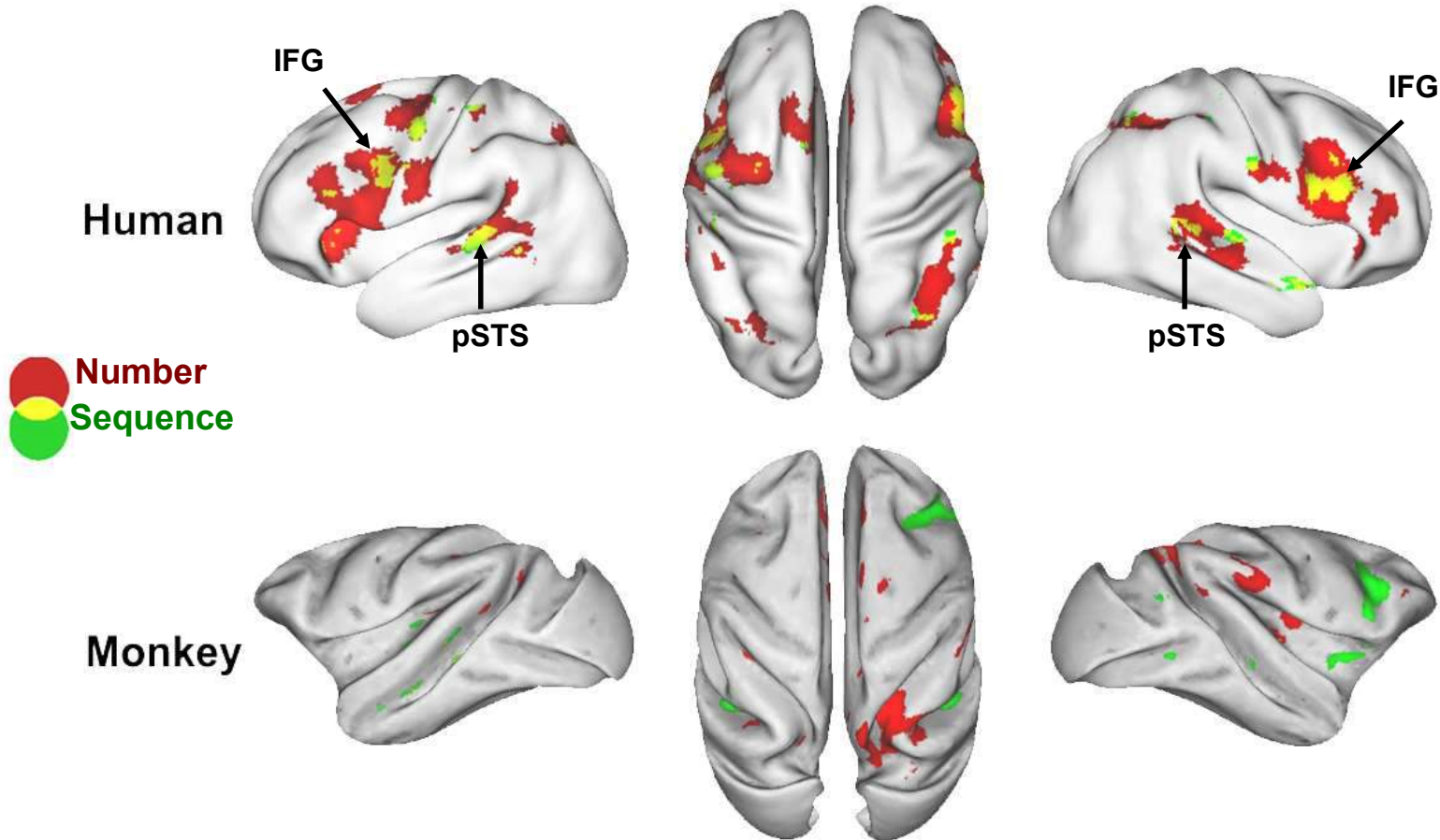
Rilling, J. K., Glasser, M. F., Preuss, T. M., Ma, X., Zhao, T., Hu, X., & Behrens, T. E. (2008). The evolution of the arcuate fasciculus revealed with comparative DTI. *Nat Neurosci*, 11(4), 426–8.



Activité cérébrale:

Des réponses uniques au cerveau humain dans la région frontale inférieure gauche

Wang, Uhrig, Jarraya & Dehaene, *Current Biology*, 2015

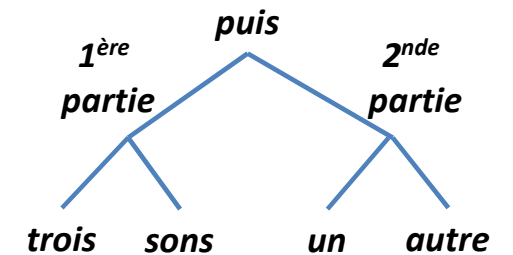


Etude en IRM fonctionnelle de l'écoute de séquences sonores élémentaires de type A A A B

Le cerveau du singe macaque détecte des violations

- Soit de nombre (par exemple A A A A B)
- Soit de séquence (par exemple A A A A)

Mais seul le cerveau humain possède des régions qui répondent aux deux types de changements



Plan du cours

- Aujourd'hui:

Mécanismes cérébraux de la syntaxe du langage:

résumé du cours de l'année dernière et données nouvelles

- 27 février:

Les réseaux de la syntaxe du langage forment-ils un module? Traitement non-conscient et premières preuves d'une spécialisation pour le langage

- 6 mars:

L'organisation psychologique des structures musicales

- 13 mars:

Les réseaux cérébraux de la syntaxe musicale

- 20 mars:

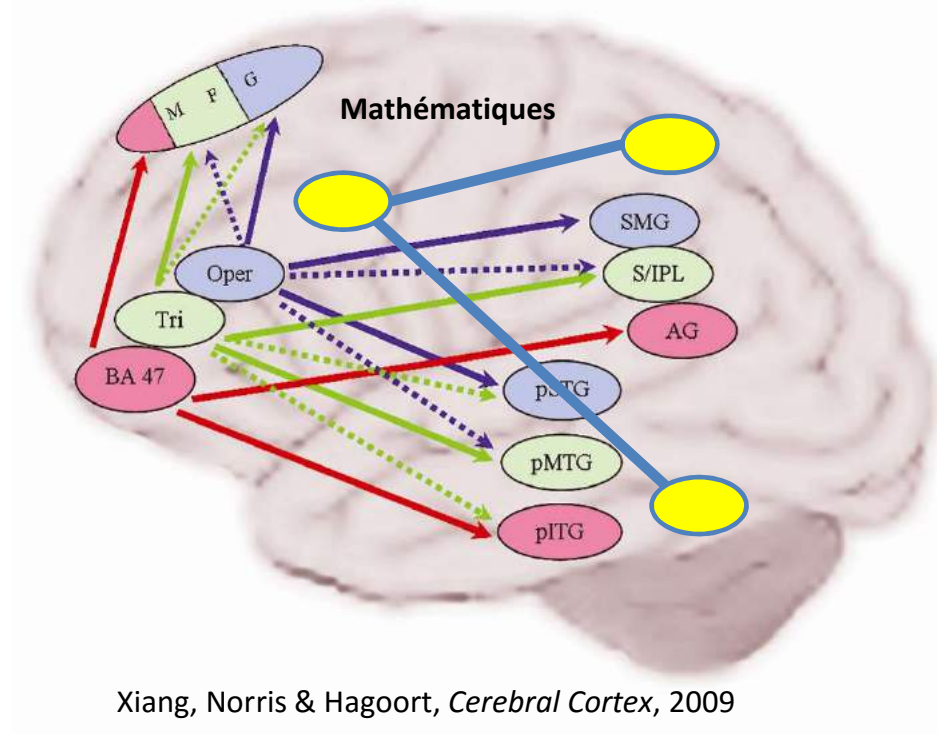
Langage et mathématiques:

des réseaux cérébraux dissociables

- 27 mars:

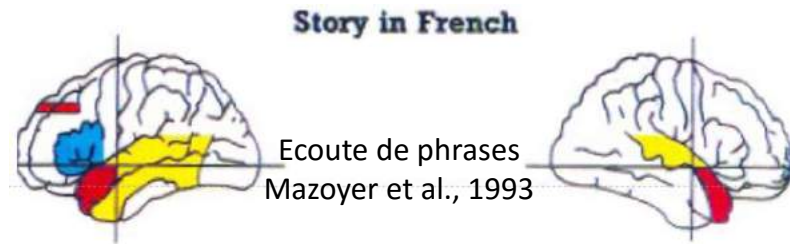
Un langage mathématique sans mots pour le dire

Conclusion: Les différents langages du cerveau font appel à des réseaux parallèles et dissociables

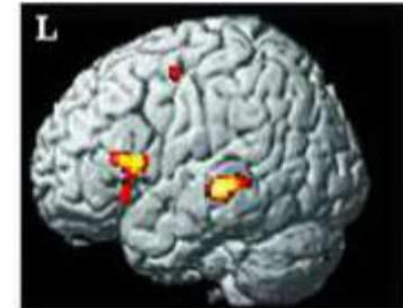


Xiang, Norris & Hagoort, *Cerebral Cortex*, 2009

Bref rappel du cours de l'année dernière



Mouvement syntaxique

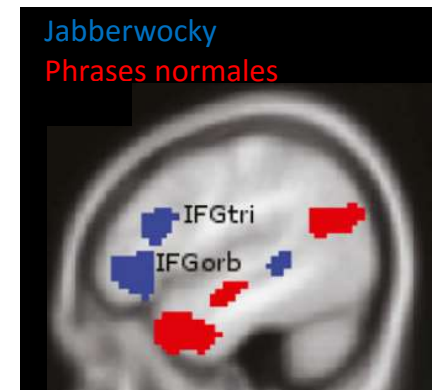


Tout au long de ce cours, nous avons observé un réseau temporo-frontal :

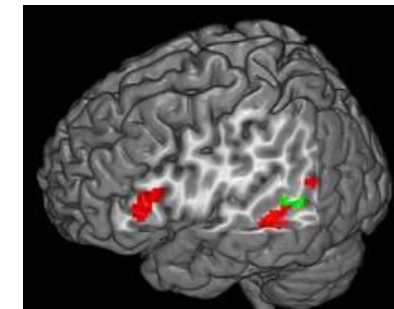
- s'activer dès que le cerveau humain représente ou manipule une phrase ou un syntagme
- En proportion du nombre de syntagmes enchâssés (*merge*)
- Et de la présence de mouvements syntaxiques (*move*)

Son activité reflète notamment

- La présence d'ambigüités syntaxiques
- La nécessité d'explorer l'arbre syntaxique
- L'apprentissage précoce de la langue maternelle, y compris la langue des signes

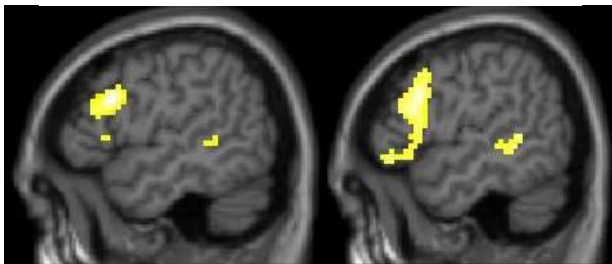


Langue des signes

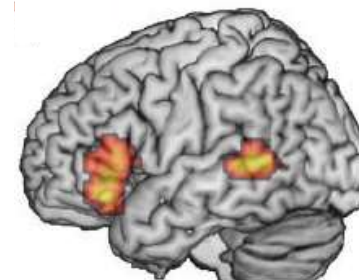


Sa lésion entraîne un agrammatisme qui se traduit par l'incapacité de produire ou de comprendre des structures syntaxiques complexes.

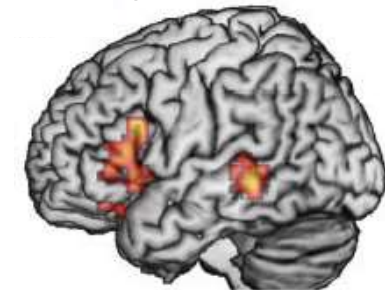
Exploration d'un arbre syntaxique



Révision d'une structure syntaxique ambiguë



Lésions conduisant à l'agrammatisme



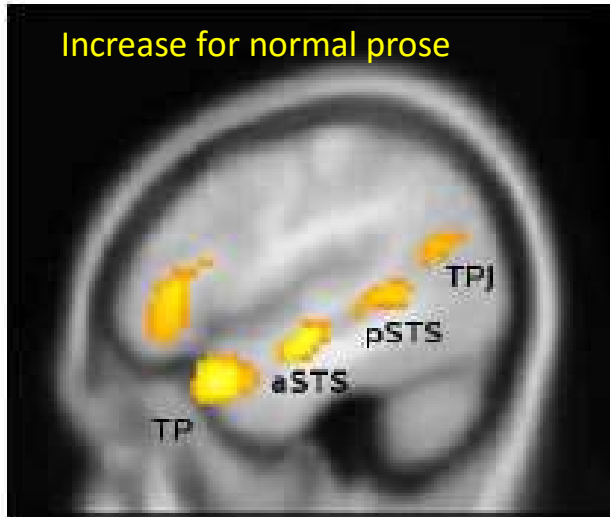
Manipulation paramétrique de la taille des syntagmes

Pallier, C., Devauchelle, A. D., & Dehaene, S. (2011). Cortical representation of the constituent structure of sentences. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 108(6), 2522–7.

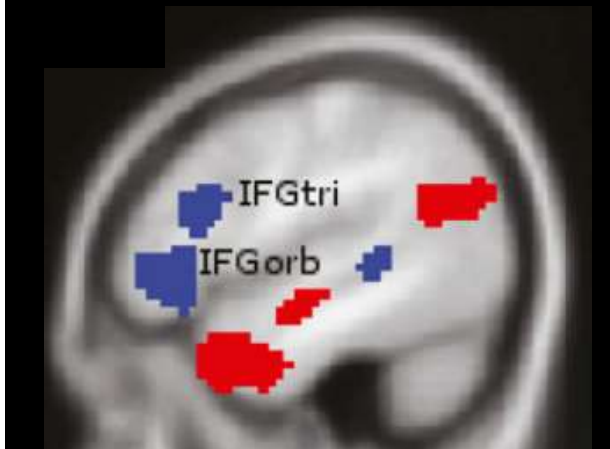
Taille des syntagmes	Exemples de stimuli
12 mots (c12)	il reçoit un sac de céréales cultivées dans le nord du pays <i>une goupe reluse des ésous qui sapitaient le chadin de la prétime</i>
6 mots (c06)	la souris qui grignote sa tartine le passant examine le luxueux canapé <i>il bloint les moribres du sotoir elle perbire le monfum des peses</i>
4 mots (c04)	le nord du pays il déteste la couleur elles lisent leur noms <i>de garsu laune lôle il dénonte ses penvêtes suire poufinir leur tésense</i>
3 mots (c03)	résoudre un problème réparent le plafond il croit lire achètera une télévision <i>la degite liforde parlenser nos viltes ton maivel secutié de son commage</i>
2 mots (c02)	des taches les sources une cabane son chien le client des trous <i>elle replose il placine le coubasment son toutourment la haisse il raconte</i>
1 mot (c01)	chose arbre que signaler elles instruments regardant tendu copie états coeur plus <i>porps ils télais pouspontels ses hitement kiviser porcupable qui tradonce chaimeur ésume</i>

Un réseau frontal, temporel et sous-cortical gauche

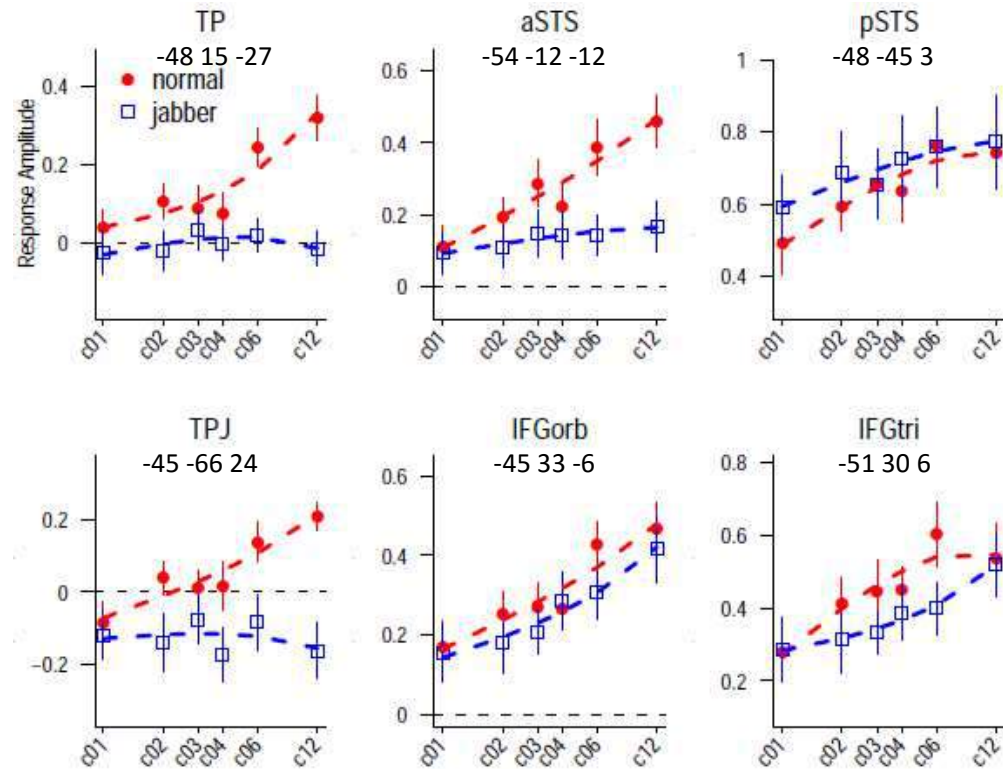
Increase for normal prose



Jabberwocky and normal prose
Increase only for normal prose



- L'activité augmente avec la taille des syntagmes dans une série de régions corticales de l'hémisphère gauche, plus le putamen gauche.
- Un sous-ensemble de régions (pSTS, IFGtri, IRGorb) répond autant aux phrases normales qu'au Jabberwocky.



A la recherche d'une opération minimale de « fusion » (*merge*)

Zaccarella, E., Meyer, L., Makuuchi, M., & Friederici, A. D. (2015). Building by Syntax: The Neural Basis of Minimal Linguistic Structures. *Cerebral Cortex* (New York, N.Y.: 1991).

Dessin expérimental 2x2 avec

- Facteur 1 = fusion (*merge*) ou pas : structure syntaxique versus liste de mots
- Facteur 2 = Type de structure: phrase complète avec verbe, ou syntagme prépositionnel

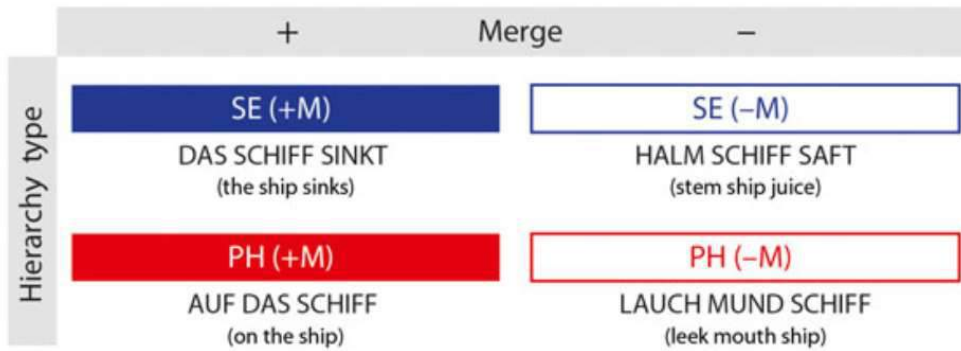
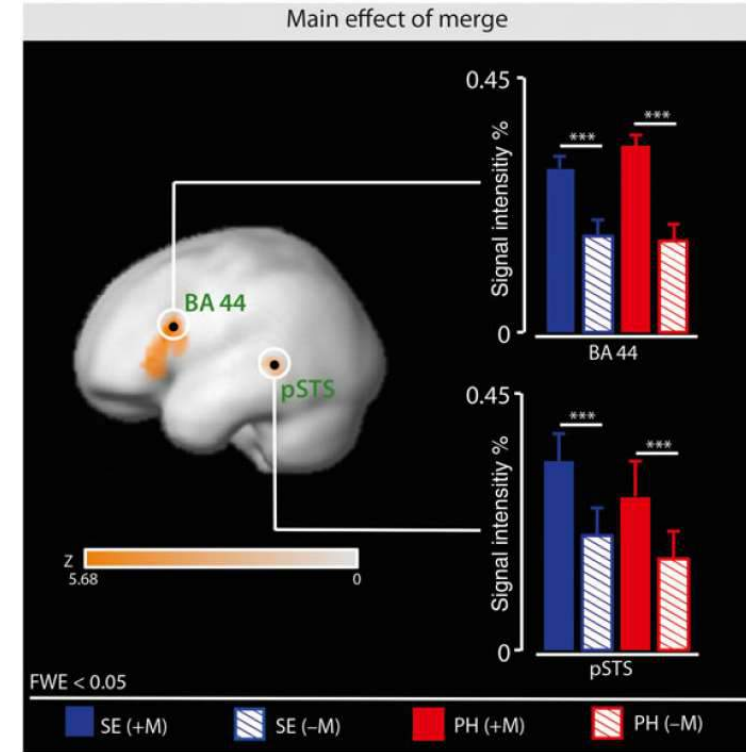


Figure 1. Experimental design: 2 × 2 design with the factors MERGE (+Merge and -Merge) and Hierarchy TYPE (Phrase vs. Sentence).

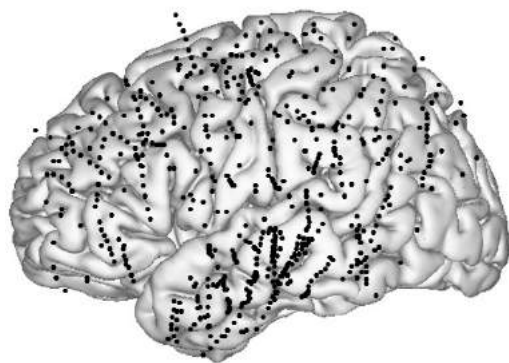
Résultats:

- Un effet principal de fusion (phrases+syntagmes > listes) est observé dans le pSTS et la région frontale inférieure gauche (BA 44 et 45).
- Il n'y a aucune interaction avec le type de structure (phrases vs syntagmes),
- Cependant, les auteurs, en restreignant l'analyse à l'aire de Broca, trouvent des pics légèrement différents pour phrase>liste et syntagme>liste (sans toutefois tester l'interaction région X condition)



Whole-brain analysis

Merge effect	X	Y	Z	Cluster size	z
Left BA44/pars opercularis	-51	11	16	190	5.68
Left pSTS	-57	-43	1	34	5.08
Broca's area					
Phrases					
BA44/pars opercularis	-51	11	19	165	5.48
Sentences					
BA45/pars triangularis	-54	26	10	82	4.10

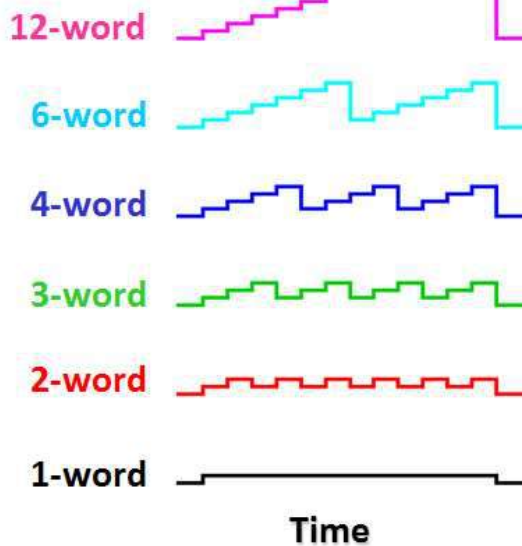


Le codage cérébral de la structure des phrases

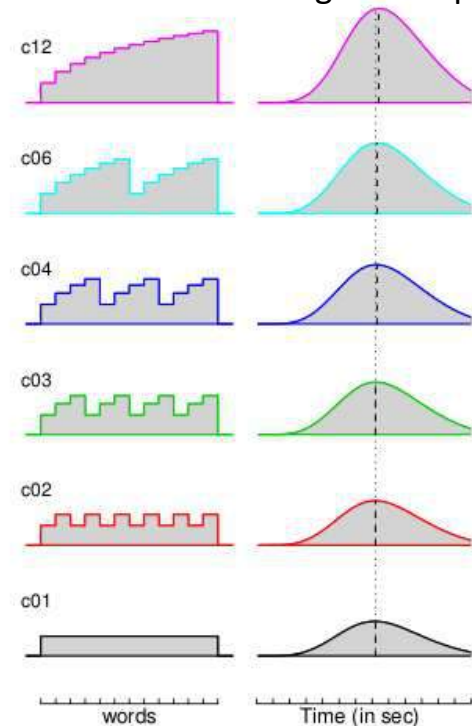
Nelson et al., article soumis

Modèle "naïf": un accroissement linéaire avec le nombre de mots fusionnés

Level of activity

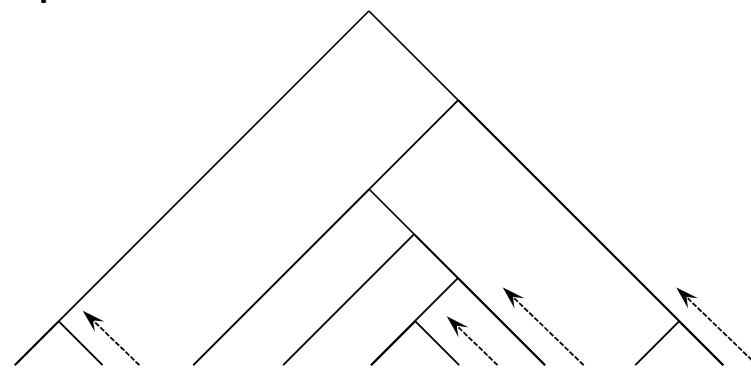


neural activity BOLD response
Observé:
un accroissement logarithmique

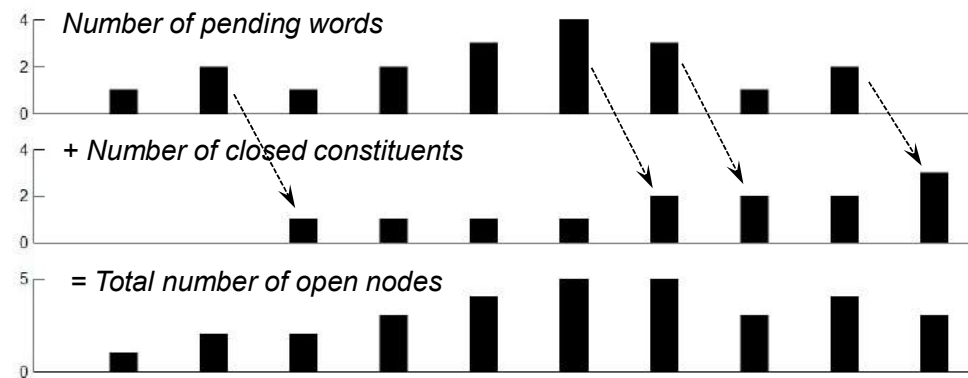


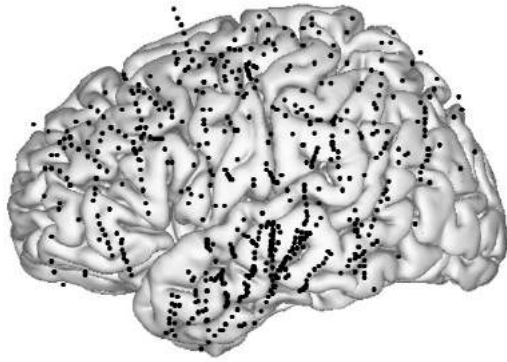
Modèle révisé

La structure hiérarchique en syntagmes enchâssés permet une **compression** de l'information sous forme d'un arbre.

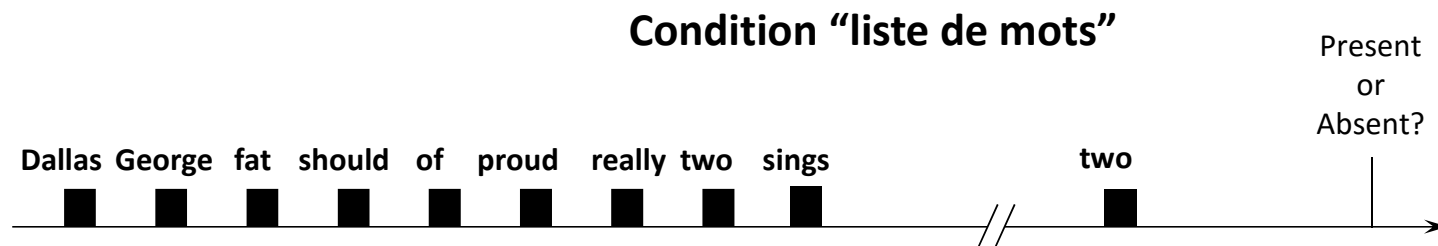
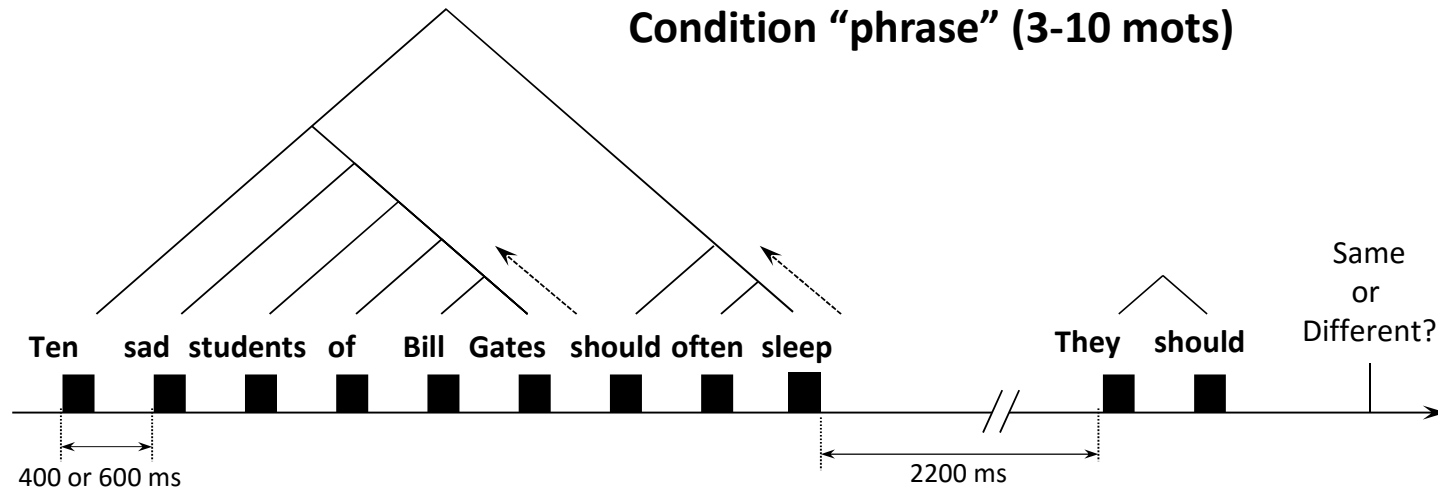


Bill Gates met two very tired dancers in Dallas



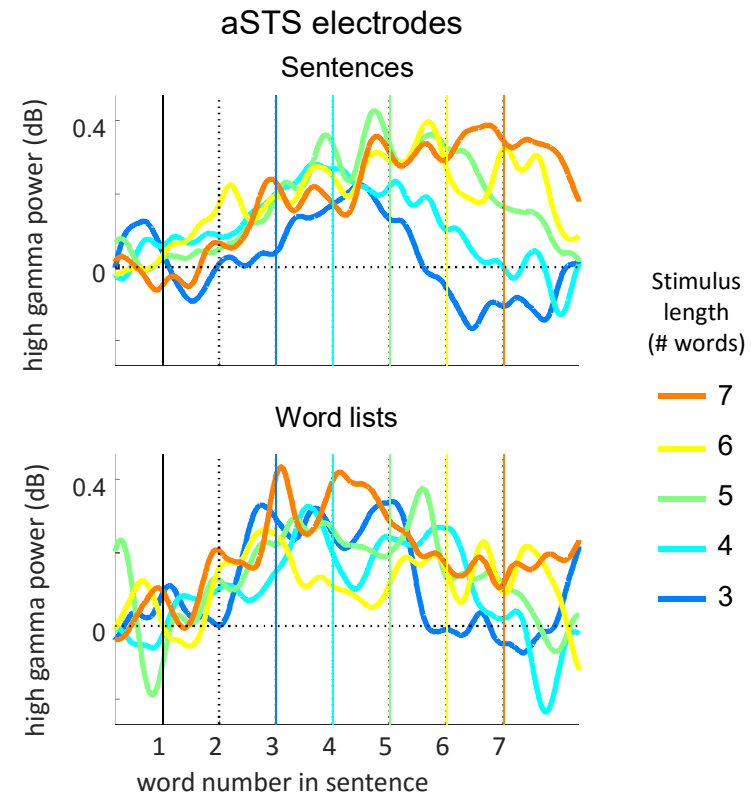
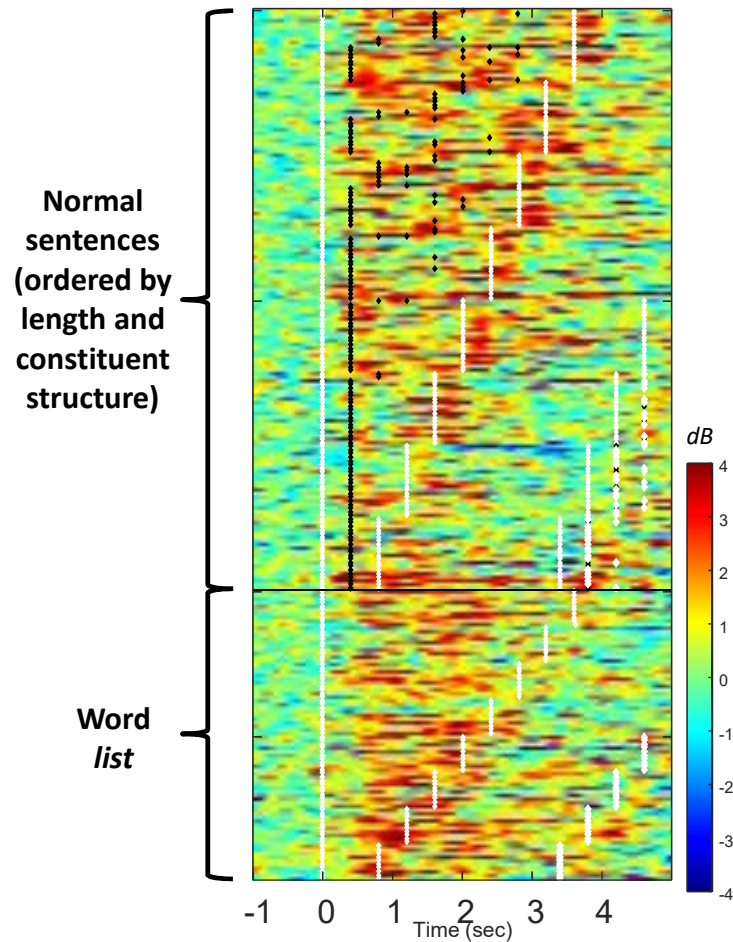
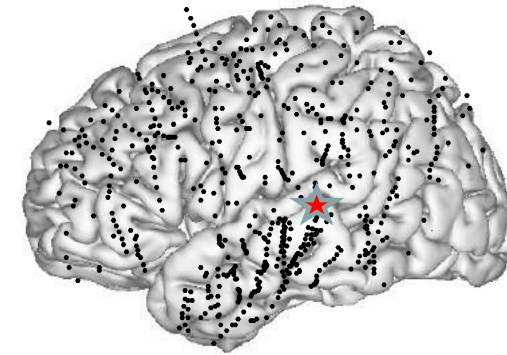


- 12 patients testés à Paris (StéréoEEG), Boston et Stanford (ECOG).
- Total de 288 paires bipolaires d'électrodes de surface (ECoG), et 433 paires bipolaires d'électrodes profondes (SEEG).
- Analyse restreinte à l'hémisphère gauche.
- Tâche = lecture d'une phrase présentée visuellement mot à mot (RSVP). Après un bref délai, comparaison avec une phrase elliptique.



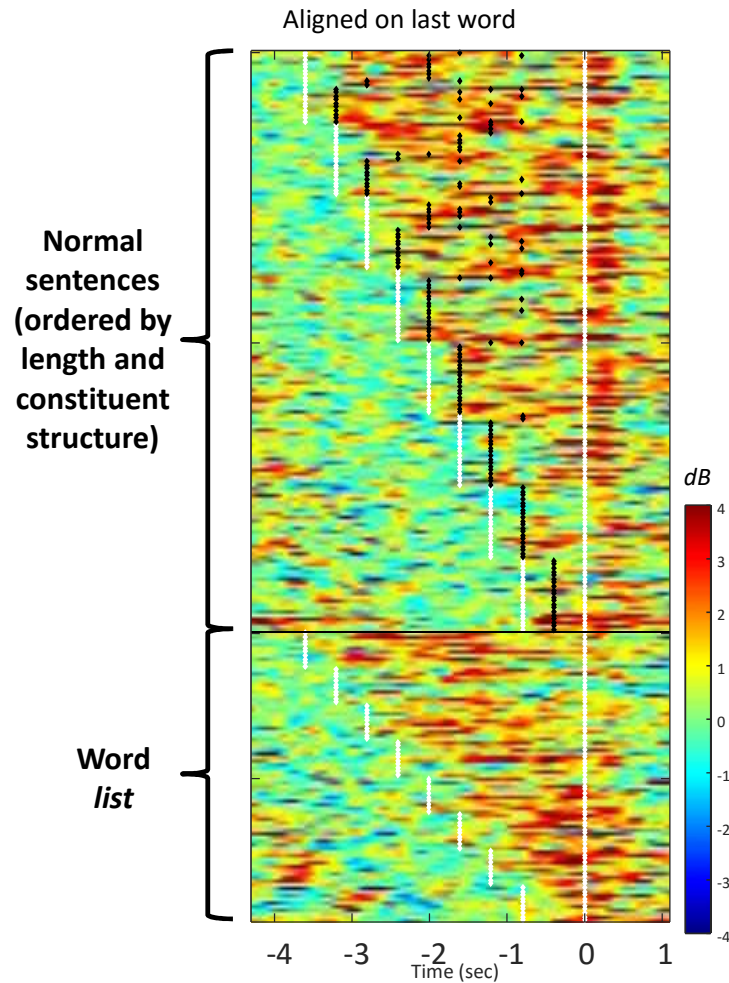
Exemple d'électrode dans le pSTS

L'activité gamma croit avec le nombre de mots présentés successivement, uniquement dans la condition « phrase ».

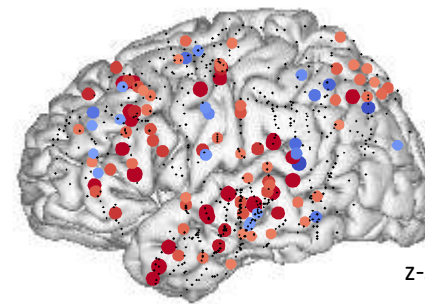


Effet de la fin de la phrase

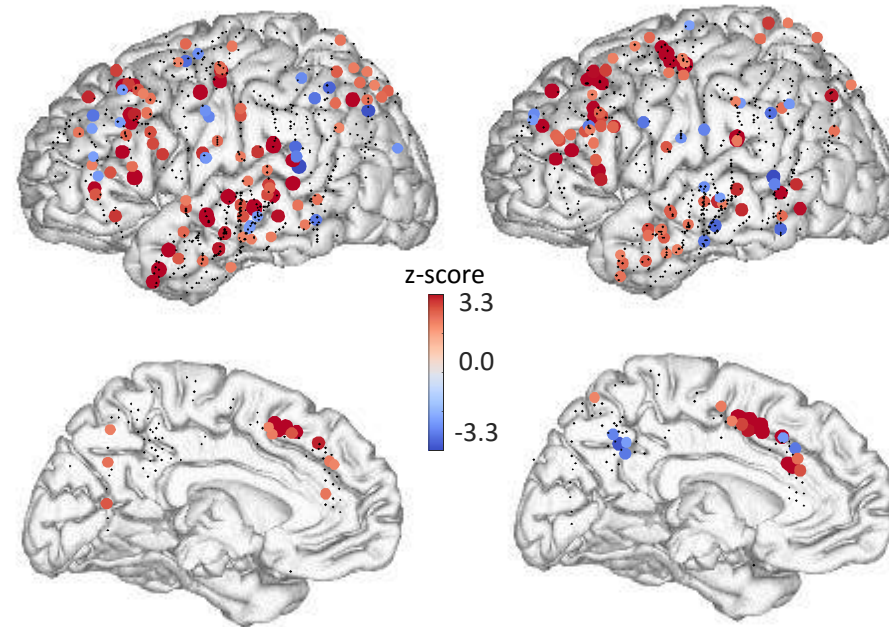
L'activité gamma s'accroît après le dernier mot d'une phrase, en proportion de sa longueur.



Fin de phrase
> milieu



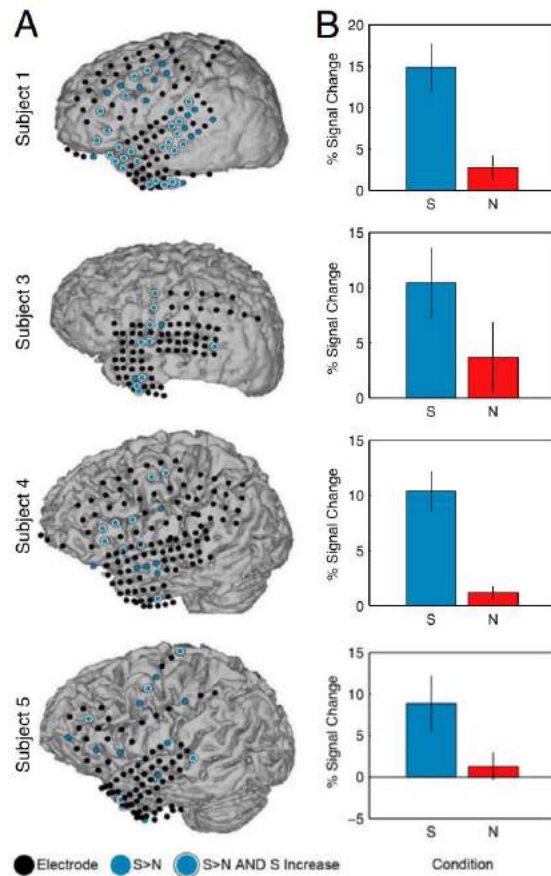
Régression de l'activité évoquée par
le dernier mot, en fonction de la
taille de la phrase



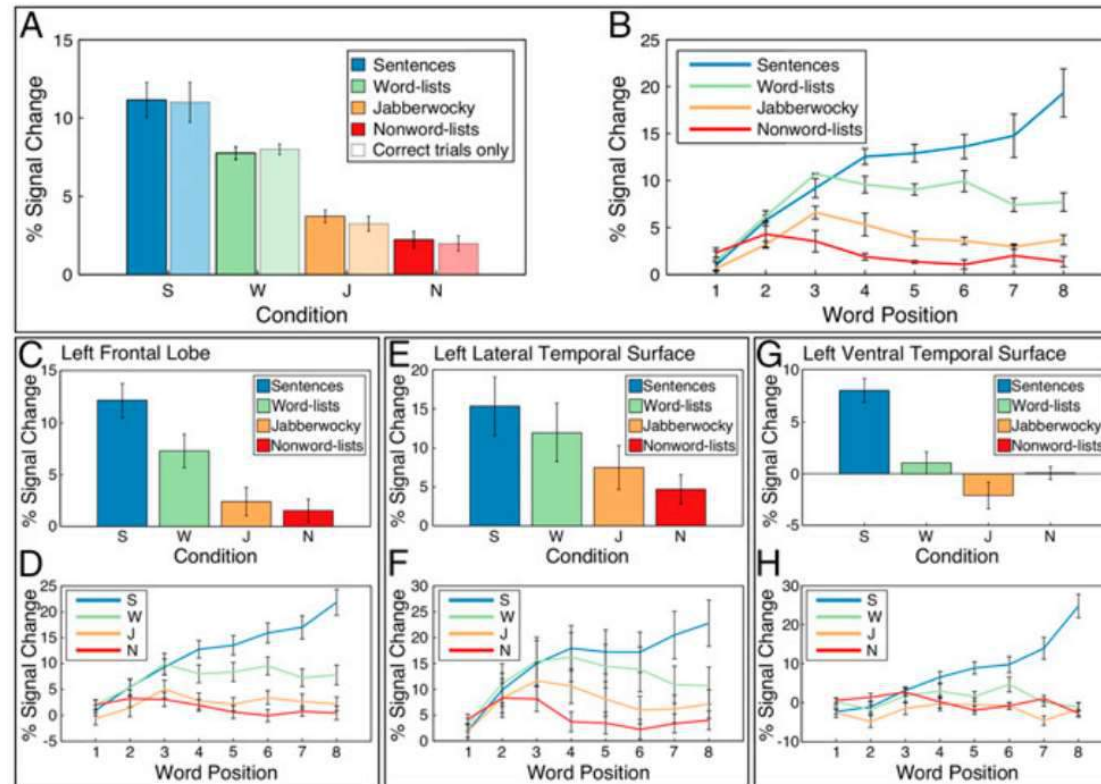
L'activité cérébrale observée constitue un corrélat possible de l' « effet de fin de phrase » en lecture (*“sentence wrap-up effect”*): un ralentissement sélectif du temps de lecture sur le dernier mot (Warren et al. 2009, Cognition)

La construction du sens des phrases: Convergence avec une étude récente

Fedorenko, E., Scott, T. L., Brunner, P., Coon, W. G., Pritchett, B., Schalk, G., & Kanwisher, N. (2016). Neural correlate of the construction of sentence meaning. PNAS, 201612132.



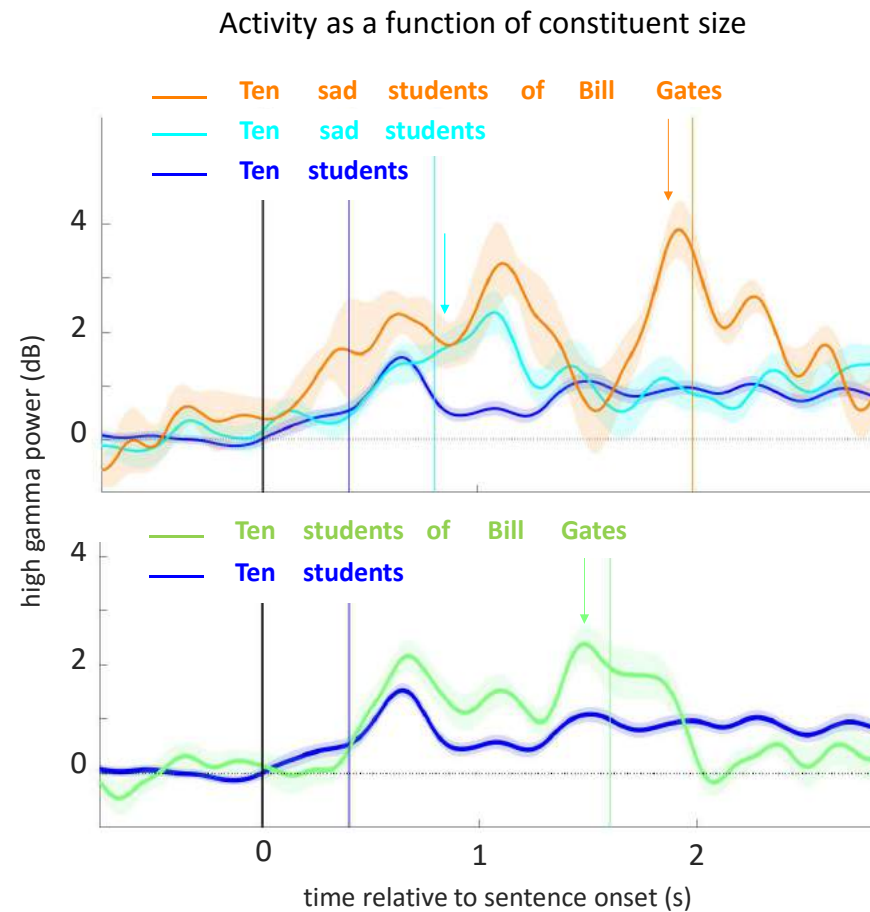
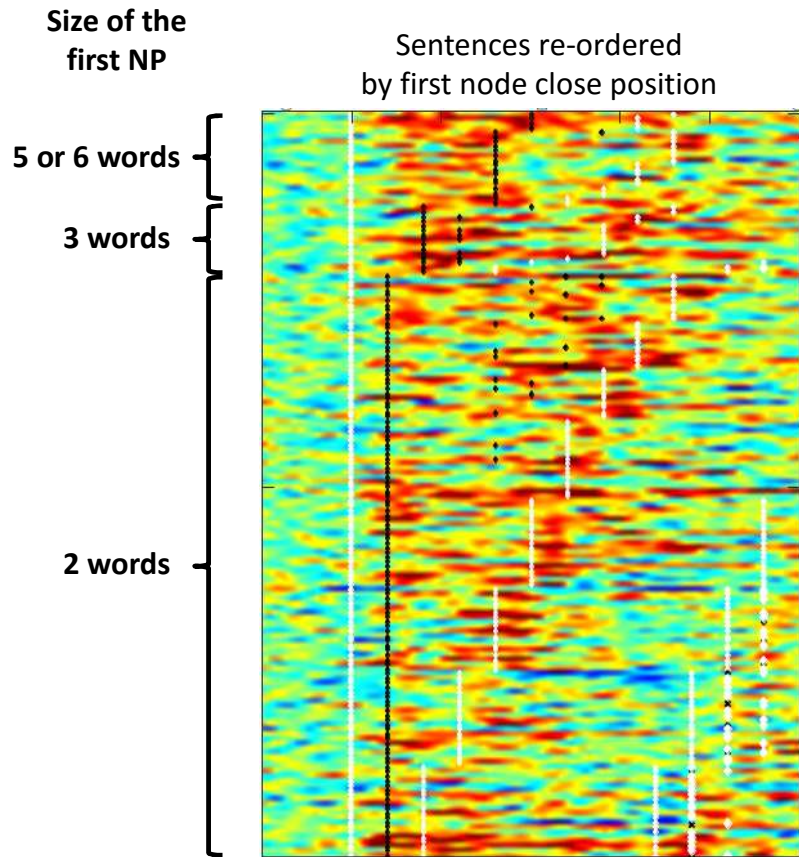
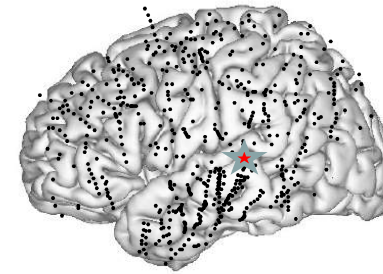
6 patients ont lu des phrases de 8 mots, du Jabberwocky, des listes de mots et de non-mots.



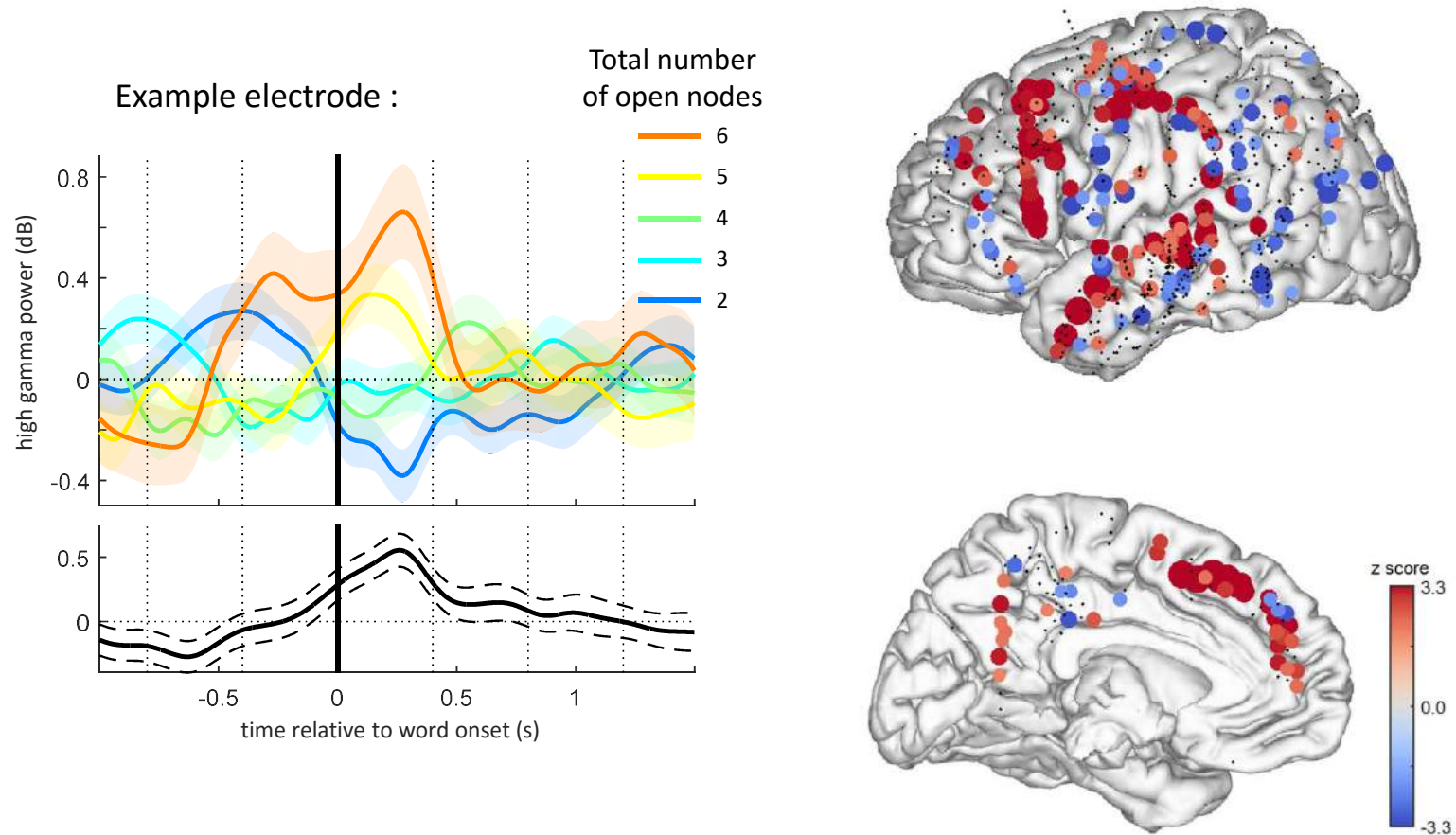
Condition	Example
Sentences	STEVE WAS LATE TO SCHOOL BECAUSE HE OVERSLEPT [probe: SCHOOL] THE RED BALLOON ROSE UP INTO THE CLOUDS [probe: WENT]
Word-lists	RAIN THE WORK BEHIND REACHED GREW KIDS OPENED [probe: GREW] STOOD THE TIED CANDLE INTO SHED THE QUICKLY [probe: WALLET]
Jabberwocky	THE GAR WAS SWARBING THE MUME FROM ATAR [probe: ATAR] TOMAL HOTHED THE BLESPLY NULO DURING THE VAYLANT [probe: FLORKY]
Nonword-lists	PHREZ CRE EKED PICUSE EMTO PECH CRE ZEIGELY [probe: PHRF7]

TRIED LE KIF

L'activation cérébrale suit étroitement la structure interne des phrases.



Le nombre de nœuds ouverts (mots ou syntagmes) prédit l'activité cérébrale à chaque instant

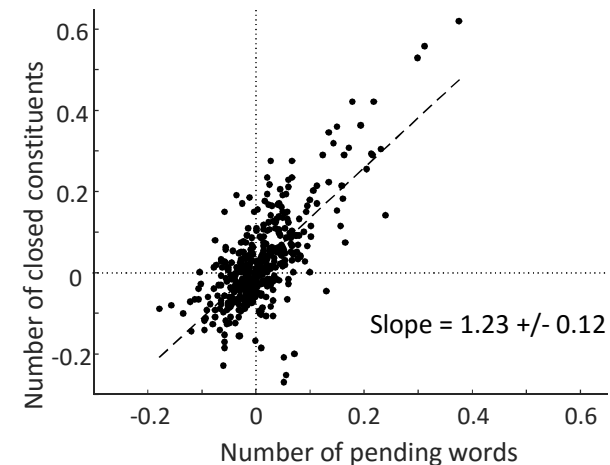
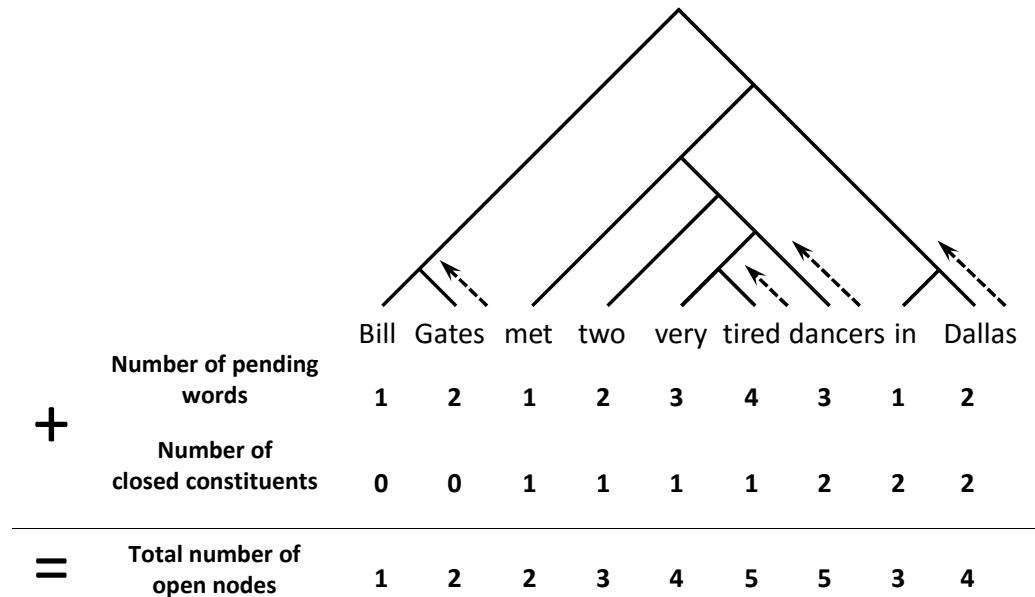


Les mots et les syntagmes ont-ils le même poids ?

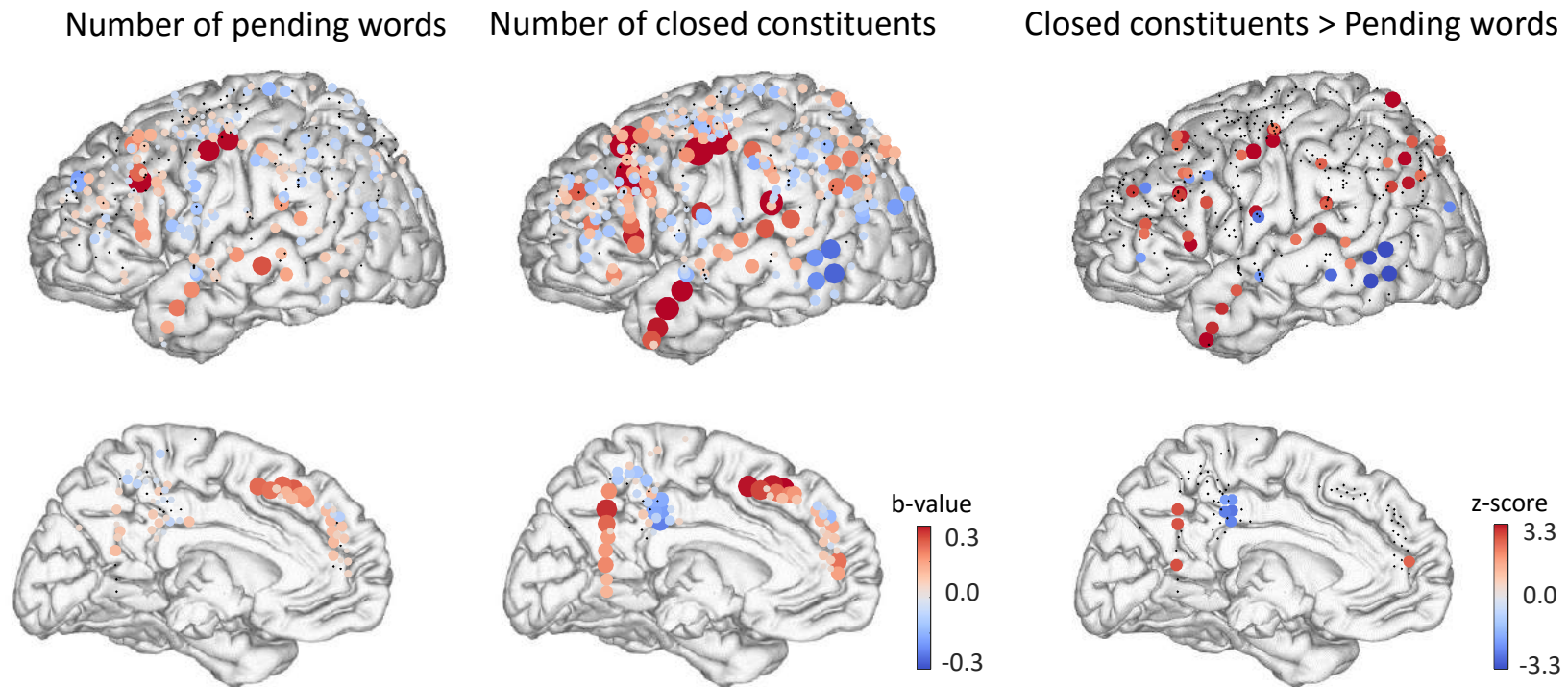
- Le concept de “nombre total de nœuds ouverts” suppose implicitement qu’un mot isolé et un syntagme de plusieurs mots contribuent autant à l’activité cérébrale totale.
- Cette idée est conforme à l’hypothèse d’une opération de fusion (*merge*) qui s’appliquerait à tous les objets linguistiques, quelle que soit leur complexité.
- Nous pouvons tester cette hypothèse: il suffit de séparer, dans la régression, l’effet du **nombre de mots restant à fusionner**, et du **nombre de syntagmes déjà assemblés** (et qui restent à intégrer à la structure globale).

A travers les électrodes, les poids de ces deux variables sont étroitement corrélés, avec une pente très proche de 1.

Cette observation suggère que les mots et les syntagmes ont pratiquement le même poids: le cerveau **comprime** les syntagmes pratiquement à la « taille » d’un seul mot.



Les mots et les syntagmes ont-ils le même poids ?



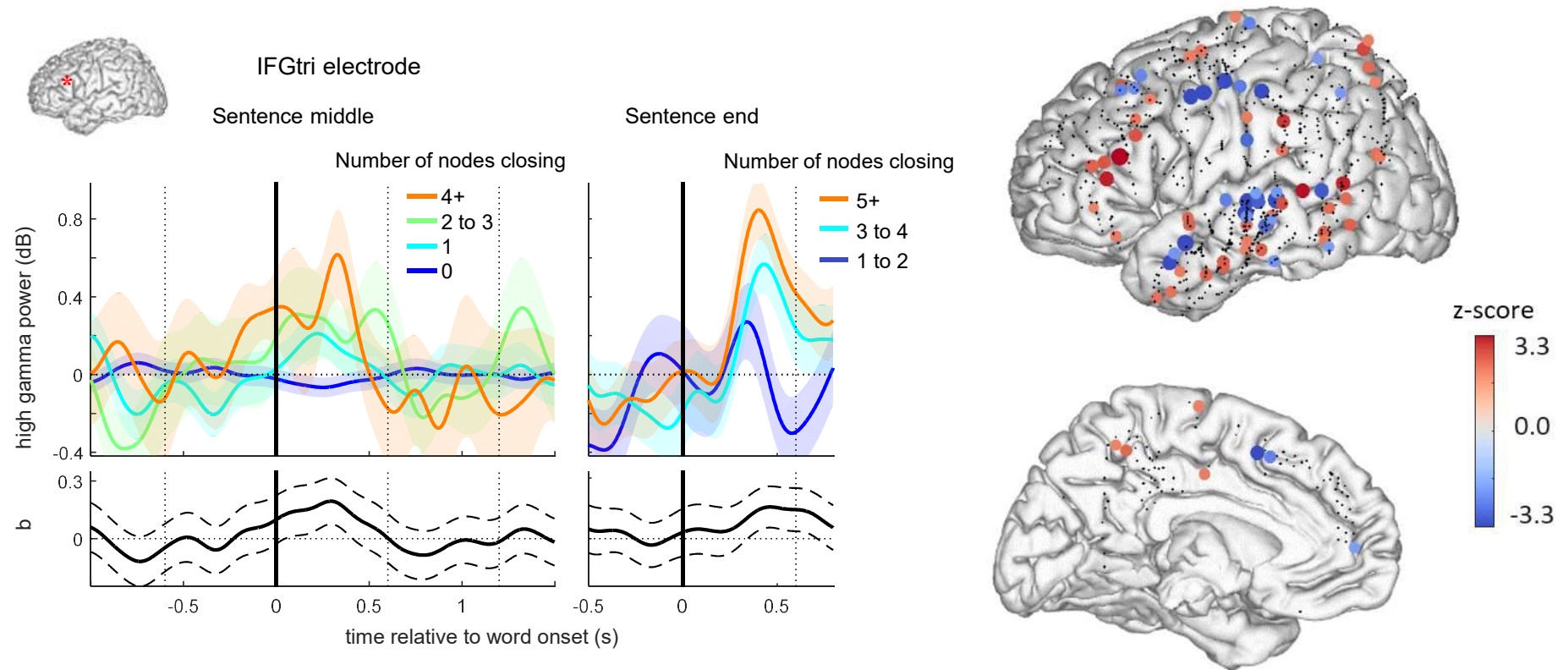
Quelques régions sont plus particulièrement affectées par les syntagmes que par les mots isolés – c’est le cas notamment du pôle temporal, du précuneus, et du lobule pariétal inférieur.

→ Ces régions pourraient jouer un rôle dans le stockage des résultats de la fusion – peut-être la représentation du sens global de la phrase?

Une activation transitoire au moment de la formation des syntagmes

Certaines régions (particulièrement l'IFG) montrent une activation supplémentaire au moment de la fermeture d'un syntagme, dont l'amplitude est proportionnelle au nombre de nœuds à assembler.

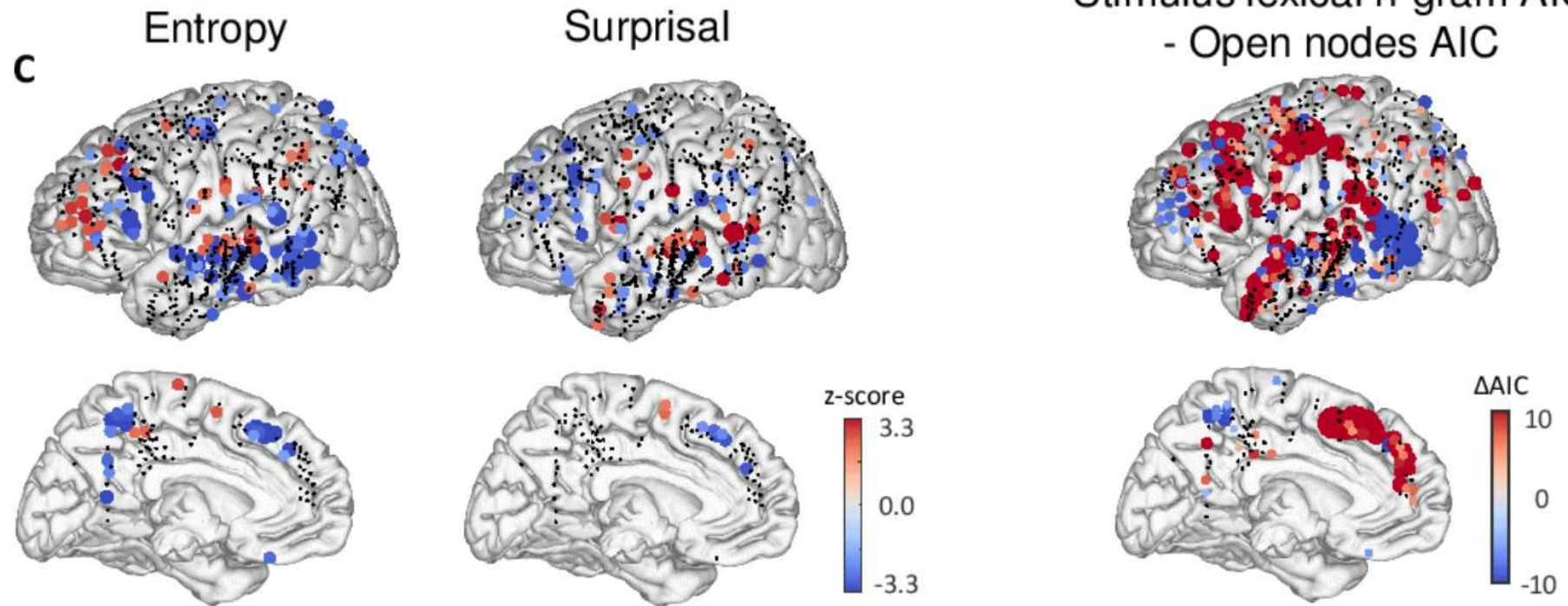
→ S'agirait-il de l'opération de fusion elle-même (*merge*)?



Avons-nous réellement besoin des arbres syntaxiques?

Evaluation de modèles fondés sur les probabilités de transition

- Certains linguistes continuent d'affirmer que la théorie linguistique peut se passer de structures arborescentes enchâssées, et que les probabilités de transition au sein de la séquence de mots suffisent à expliquer l'organisation du langage (e.g. Frank, Bod & Christiansen, 2012).
- Les probabilités de transition et leurs dérivés (entropie, surprisal) affectent effectivement l'activité cérébrale et le comportement.
- Nous avons testé un grand nombre de modèles fondés sur les probabilités de transition: au niveau du mot ou de la catégorie grammaticale, et calculées par Google Ngrams ou avec notre programme.
- Un effet existe dans la région temporale moyenne... mais il ne suffit pas à expliquer l'activité de l'ensemble du réseau:



Comparaison de différentes stratégies d'analyse syntaxique (*parsing*)

- Le nombre de mots ne peut être qu'une approximation de la complexité des arbres syntaxiques.
- En principe, l'activité cérébrale devrait refléter la nature des opérations syntaxiques employées pour former les arbres (*parsing*).
- En collaboration avec John Hale, nous avons estimé la charge de traitement syntaxique prédite par 3 « *parsers* ».

Bottom-up

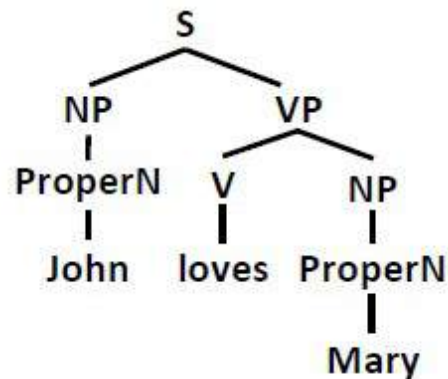
Stack	Operations
[S]	shift John
John [S]	reduce by ProperN→John
ProperN [S]	reduce by NP→ProperN
NP [S]	shift loves
loves NP [S]	reduce by V→loves
V NP [S]	shift Mary
Mary V NP [S]	reduce by ProperN→Mary
ProperN V NP [S]	reduce by NP→ProperN
NP V NP [S]	reduce by VP→V NP
VP NP [S]	reduce by S→NP VP

Left-corner

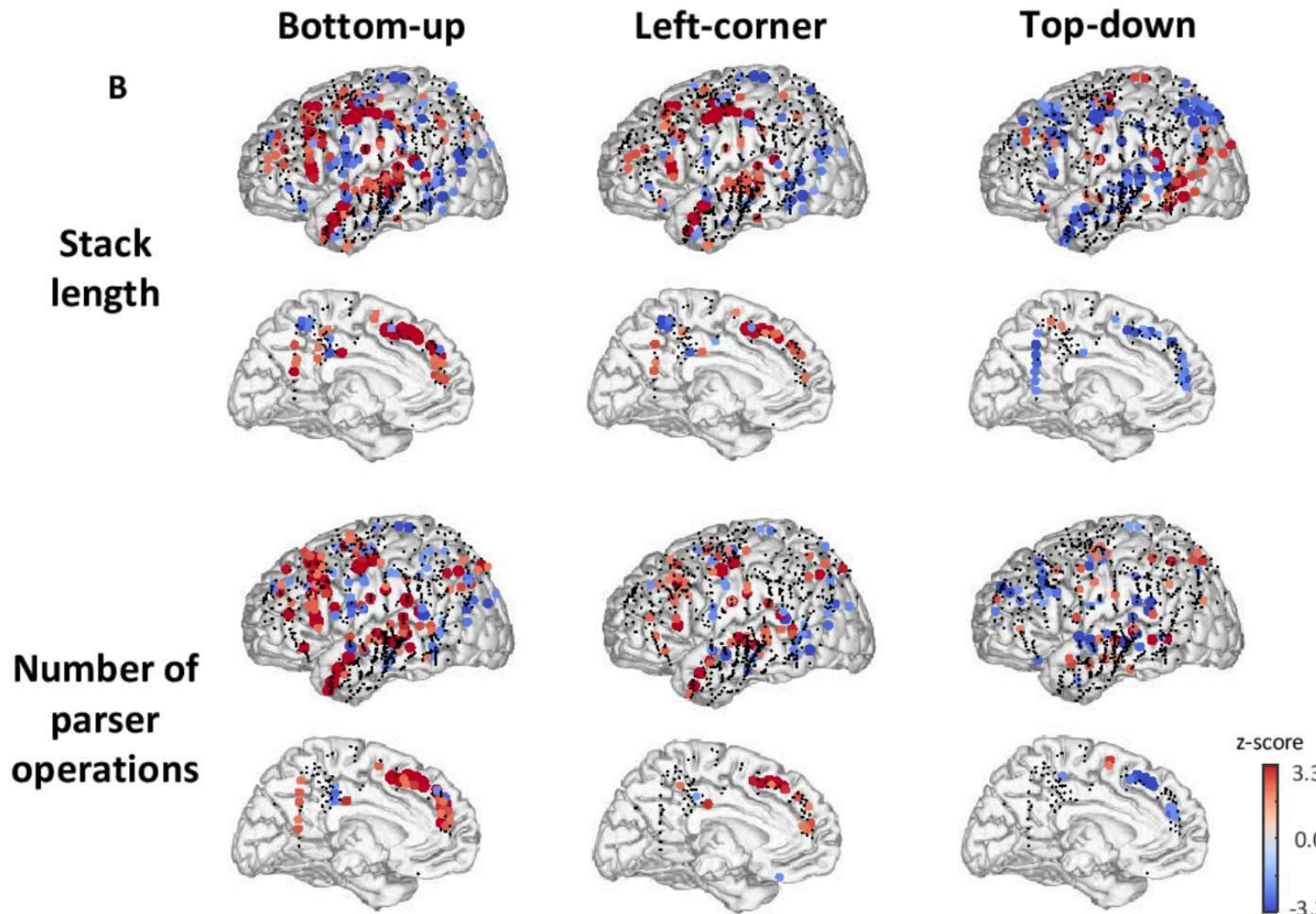
Stack	Operations
[S]	shift John
John [S]	project ProperN→John
ProperN [S]	project NP→ProperN
NP [S]	project+complete S→NP VP
[VP]	shift loves
loves [VP]	project V→loves
V [VP]	project+complete VP→V NP
[NP]	shift Mary
Mary [NP]	project ProperN→Mary
ProperN [NP]	project+complete NP→ProperN

Top-down

Stack	Operations
[S]	expand by S→NP VP
[NP] [VP]	expand by NP→ProperN
[ProperN] [VP]	expand by ProperN→John
[John] [VP]	scan John
[VP]	expand by VP→V NP
[V] [NP]	expand by V→loves
[loves] [NP]	scan loves
[NP]	expand by NP→ProperN
[ProperN]	expand by ProperN→Mary
[Mary]	scan Mary



Comparaison de différentes stratégies d'analyse syntaxique (*parsing*)



Le modèle *bottom-up* (et dans une moindre mesure le modèle *left-corner*) prédisent bien l'activité du réseau des aires du langage.

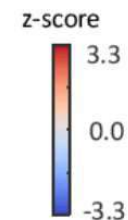
De fait, le modèle fondé sur les « nœuds ouverts » (*open nodes*) est remarquablement proche des opérations du modèle *bottom-up*.

Les variables de ces deux modèles sont étroitement corrélées:

$r=0.97$ entre le nombre de nœuds ouverts et la taille de la pile.

$r=0.89$ entre le nombre d'opérations syntaxiques et le nombre de nœuds fermés.

→ Le modèle *bottom-up* peut être considéré comme une implémentation concrète de l'idée des nœuds ouverts.



Résumé: Une première preuve directe du fait que le cerveau utilise des arbres pour comprimer l'information présente dans les phrases

L'activité ne se contente pas de croître avec chaque mot, mais elle décroît également lorsqu'une opération syntaxique permet de **comprimer** plusieurs mots en un seul syntagme.

- Ces résultats permettent d'expliquer
- Pourquoi l'activité en IRMf croît comme une fonction approximativement logarithmique de la longueur de la phrase.
 - Pourquoi la mémoire est meilleure pour les phrases que pour les listes de mots.

