

Cours 2015:

Représentation cérébrale des structures linguistiques

Stanislas Dehaene

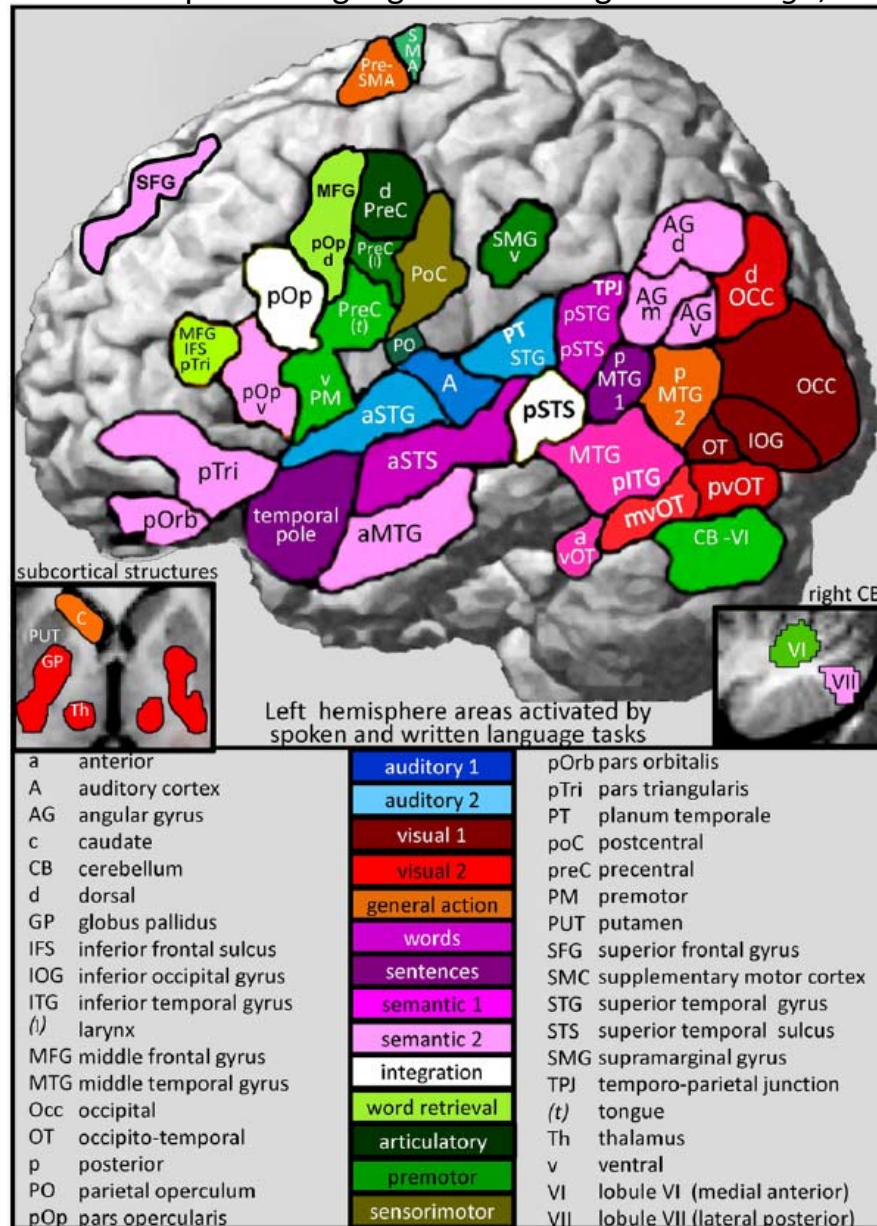
Chaire de Psychologie Cognitive Expérimentale

Cours n°4

**Décomposition anatomique
et fonctionnelle des aires du langage**

Une grande variété d'observations d'imagerie cérébrale

Price, C. J. (2012). A review and synthesis of the first 20 years of PET and fMRI studies of heard speech, spoken language and reading. *NeuroImage*, 62(2), 816–847.



Consistent structure-to-function mappings in language studies.

ACC-a zone	Suppressing the production of unintended words
ACC-p zone	Motor execution (suppressing unintended motor activity)
ANG	Integrating/predicting semantics
CB [IV and V]	Silent articulatory planning
CB [VI/VIII]	Retrieving words for speech production
CB [VI] medial	Timing of motor output
CB [VIII]	Sensitive to timing of auditory inputs and motor activity
Ins-a	Control of breathing during production of speech
ITG-p	Accessing semantics during word production tasks
ITG-a	Semantic associations
MFG	Retrieving words for speech production
MTG-p	Accessing semantics
MTG-a	Semantic associations
PM-d	General action selection (i.e. not specific to speech articulation)
PM-v	Orofacial motor planning (articulatory recoding)
pOp	Short term memory and integrating inputs, expectations, meaning
pOp-d	Sequencing subsequent motor activity
pOp-v	Articulatory recoding (orofacial motor planning)
pOrb	Selection/retrieval or semantic concepts/words
PreC/PoC	Orofacial motor activity (d-to-v: lips, jaw, laryngeal, tongue)
Pre-SMA	Sequencing motor plans (not specific to articulation)
PT	Acoustic processing/auditory imagery/auditory expectations
pTri	Semantic decisions/semantic reading
PUT	Timing of motor output
SFG	Semantic/word selection depending on semantic context
SMA	Sequencing execution of motor movements (speech and fingers)
SMG-v	Articulatory loop/auditory expectations
STG-a	Early auditory processing of complex sounds
STG-p	Auditory processing/word retrieval with minimal semantics
STS-a	Semantic associations
STS-p	Integrating familiar sounds, articulation and meaning
TH v-l	Control of breathing during speech production
TPJ	Auditory short term memory/word retrieval with minimal semantics
vOT	Linking visual forms to the semantic system
vOT-a	Accessing semantics from visual forms
vOT-p	Early visual processing of sublexical forms.

L'organisation cyto-architectonique de la région « de Broca » : Subdivisions identifiées par Brodmann

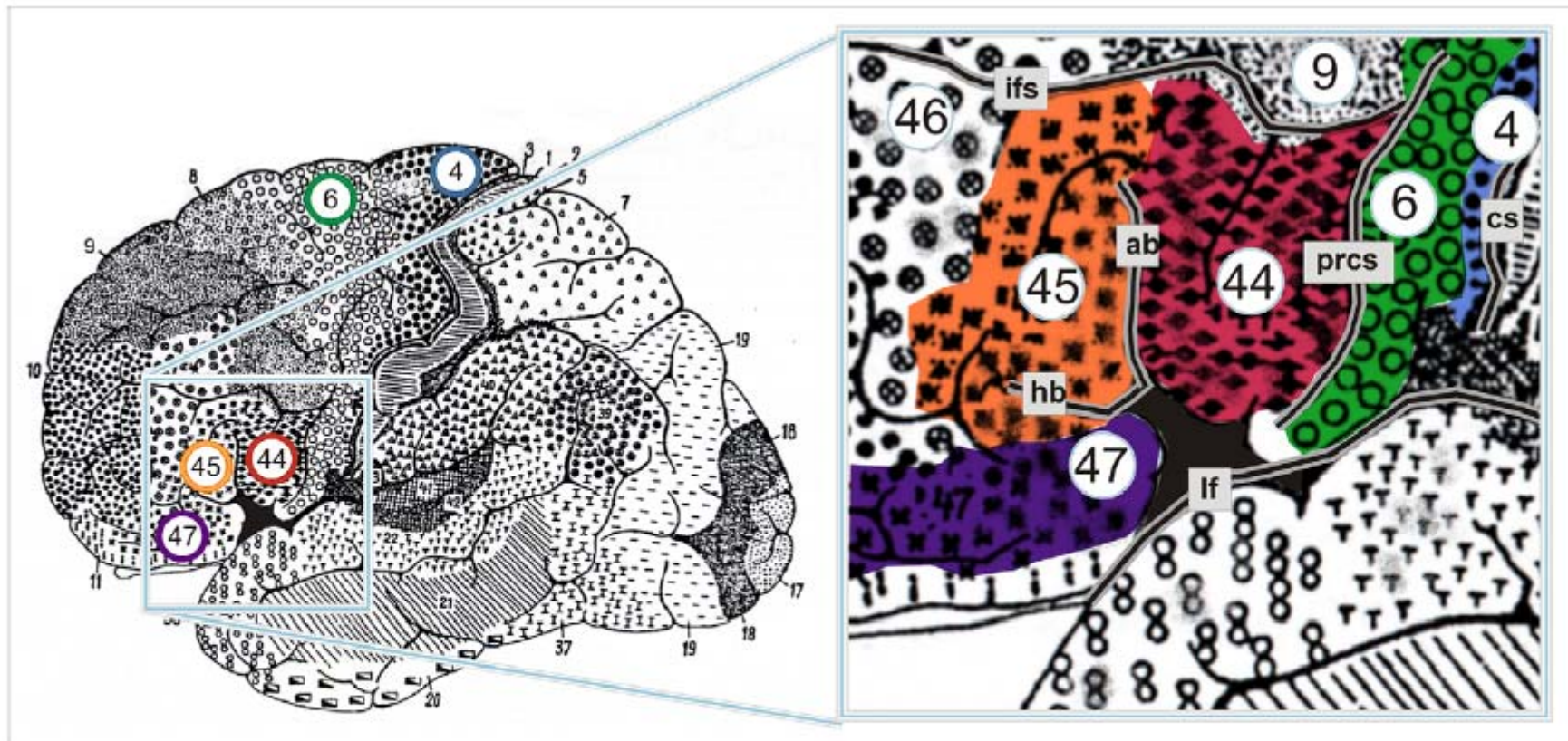
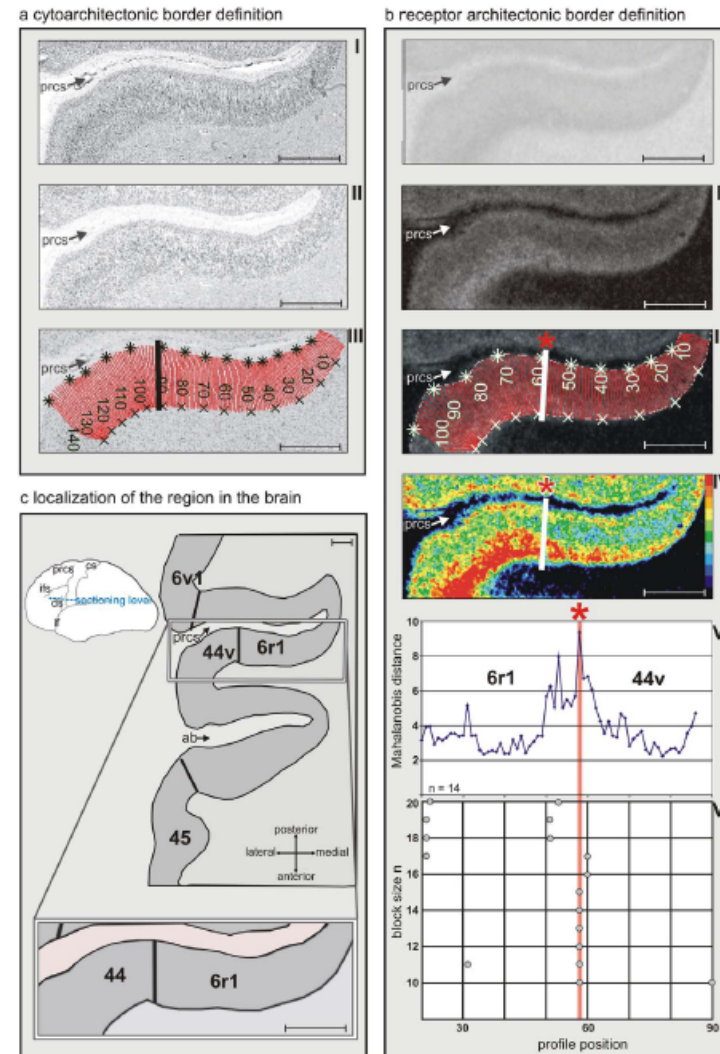
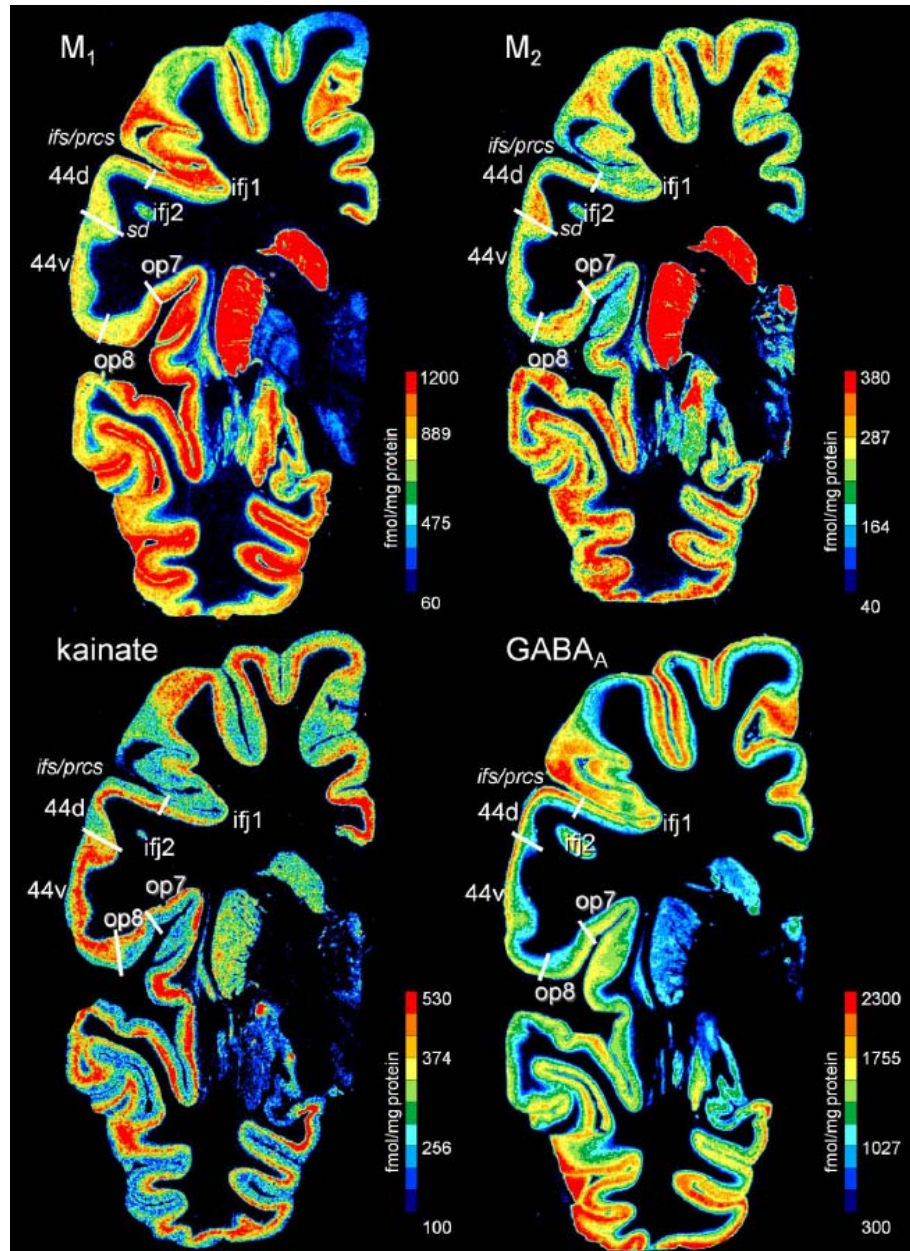


Figure 1. Cytoarchitectonic map of the lateral surface of a human cortex adapted from Brodmann [5]. The region of interest contains areas 44 and 45 as well as parts of the neighboring areas 4, 6, and 47. Note that Brodmann's map does not show the ventral border of area 44, 45, and 6 in the depth of the lateral fissure. ab, ascending branch of the lateral fissure; cs, central sulcus; hb, horizontal branch of the lateral fissure; ifs, inferior frontal sulcus; lf, lateral fissure; prcs, precentral sulcus.
doi:10.1371/journal.pbio.1000489.g001

L'analyse de 6 types de récepteurs conduit à une nouvelle subdivision de la région « de Broca ».

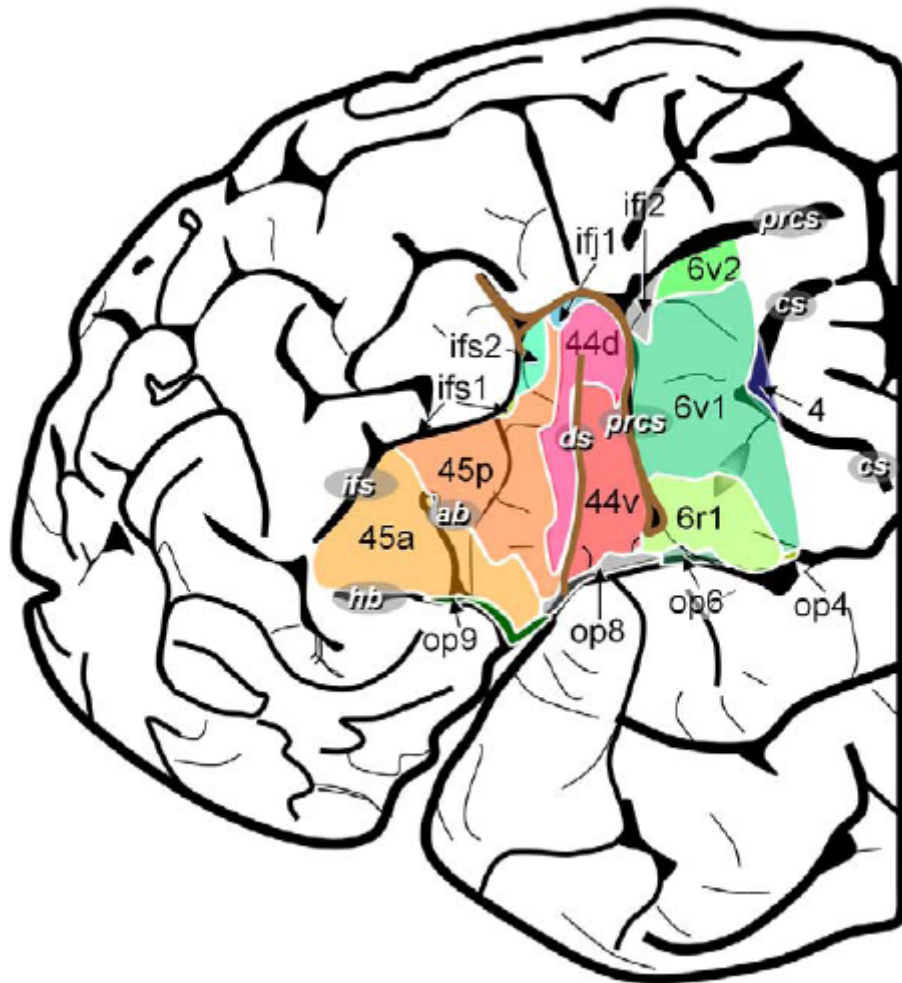
Amunts, K., Lenzen, M., Friederici, A. D., Schleicher, A., Morosan, P., Palomero-Gallagher, N., et al. (2010). Broca's region: novel organizational principles and multiple receptor mapping. *PLoS Biol*, 8(9).



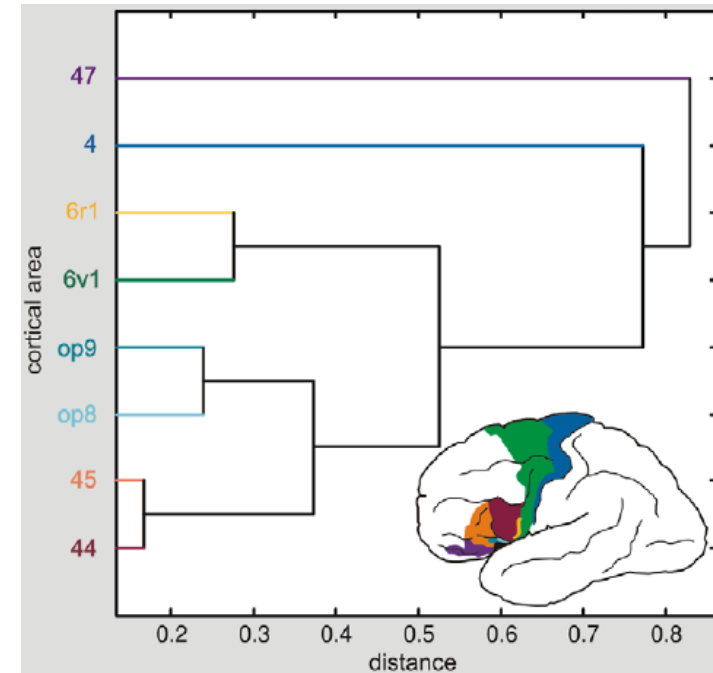
L'analyse de 6 types de récepteurs conduit à une nouvelle subdivision de la région « de Broca ».

Amunts, K., Lenzen, M., Friederici, A. D., Schleicher, A., Morosan, P., Palomero-Gallagher, N., et al. (2010). Broca's region: novel organizational principles and multiple receptor mapping. *PLoS Biol*, 8(9).

Subdivision finale de la région « de Broca » :



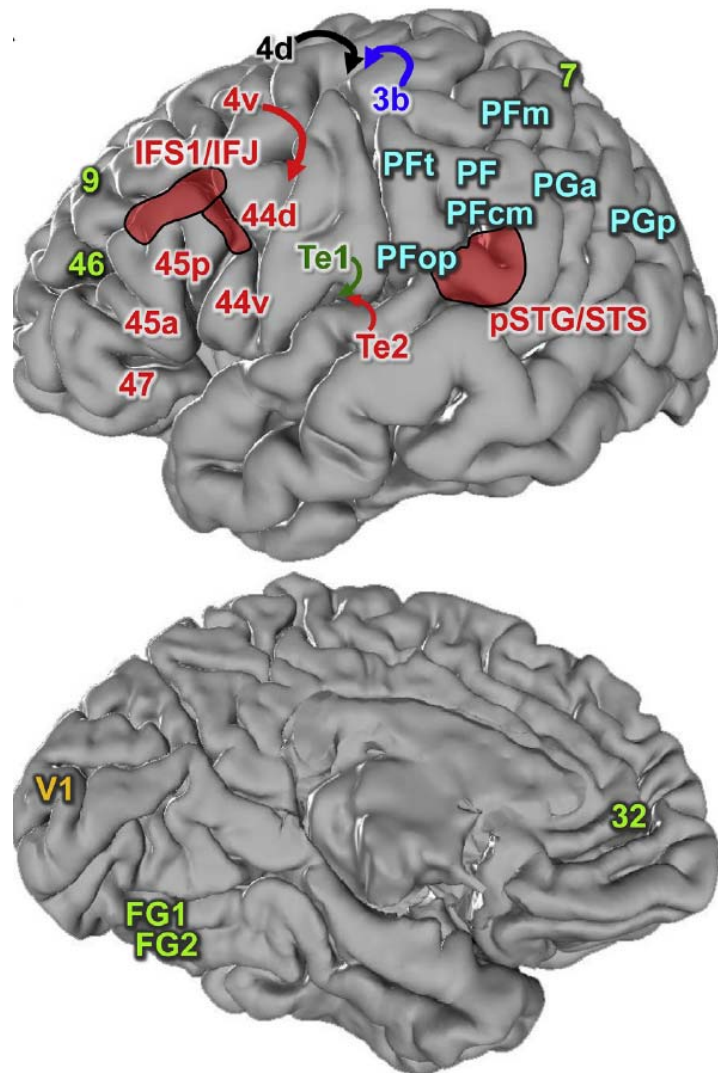
Ressemblances entre les profils de densité de récepteur dans les différentes aires de Brodmann



Latéralisation: seul le récepteur muscarinique M2 de l'acétylcholine, particulièrement dense dans les aires 44 et 45, montre une latéralisation en faveur de l'hémisphère gauche.

Les aires frontales et temporales impliquées dans le traitement du langage partagent la même densité de récepteurs

Zilles, K., Bacha-Trams, M., Palomero-Gallagher, N., Amunts, K., & Friederici, A. D. (2015). Common molecular basis of the sentence comprehension network revealed by neurotransmitter receptor fingerprints. *Cortex*, 63, 79–89.



Examen post-mortem, chez deux hommes et deux femmes, de la densité de 15 récepteurs dans 26 aires cérébrales distinctes de l'hémiphère gauche.

Comparaison, automatisée, des profils de densité de ces récepteurs entre les régions.

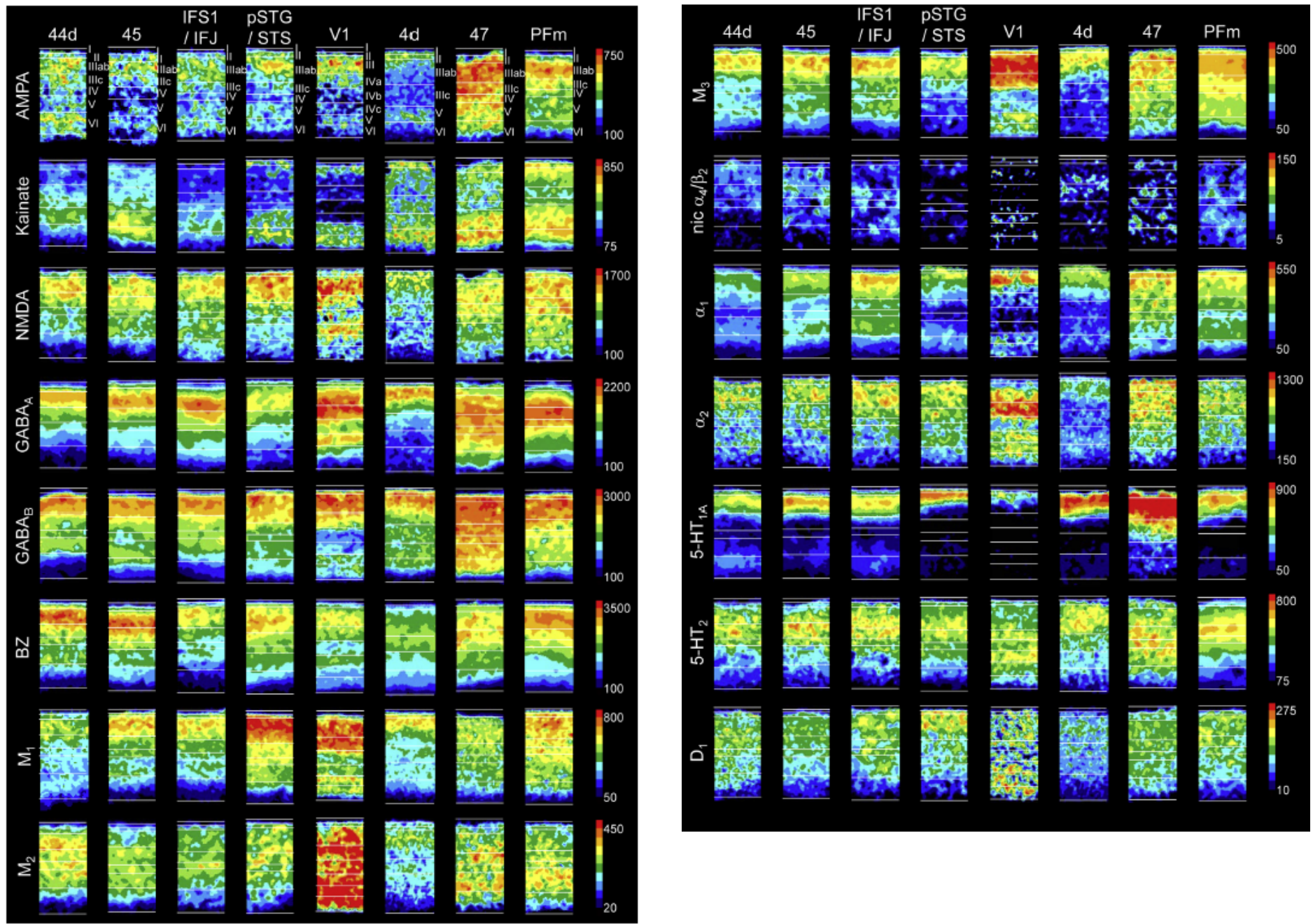
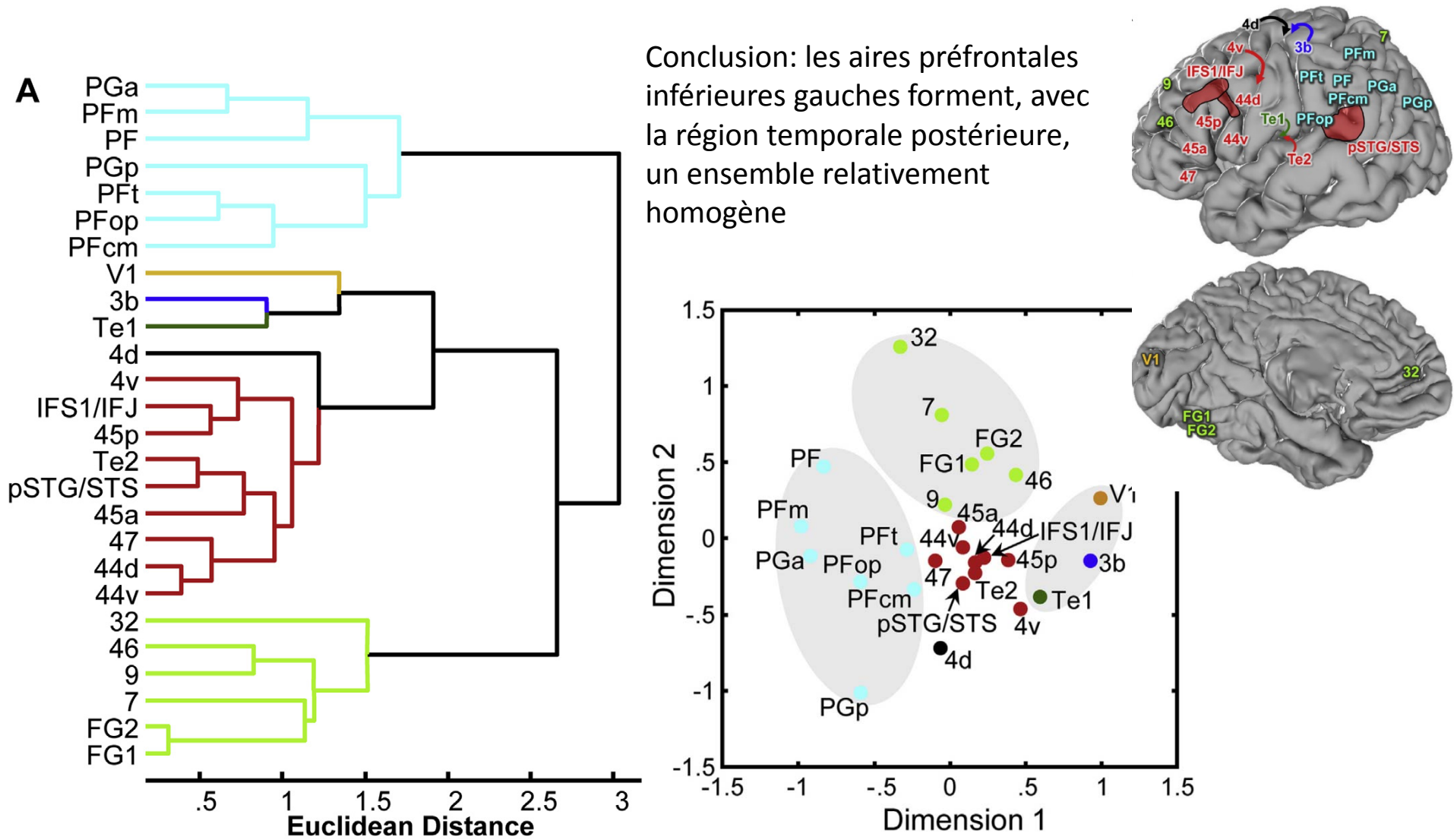


Fig. 2 – Laminar distribution of receptors in selected cortical areas. Color coded receptor autoradiographs visualizing the laminar distribution of glutamate (AMPA, kainate, NMDA), GABA (GABA_A, GABA_B, GABA_A associated benzodiazepine (BZ) binding sites), acetylcholine (M₁, M₂, M₃, nicotinic α₄/β₂), norepinephrine (α₁, α₂), serotonin (5-HT_{1A}, 5-HT₂) and dopamine (D₁) receptors in 8 of the 26 examined brain areas. Color coding indicates receptor densities in fmol/mg protein.

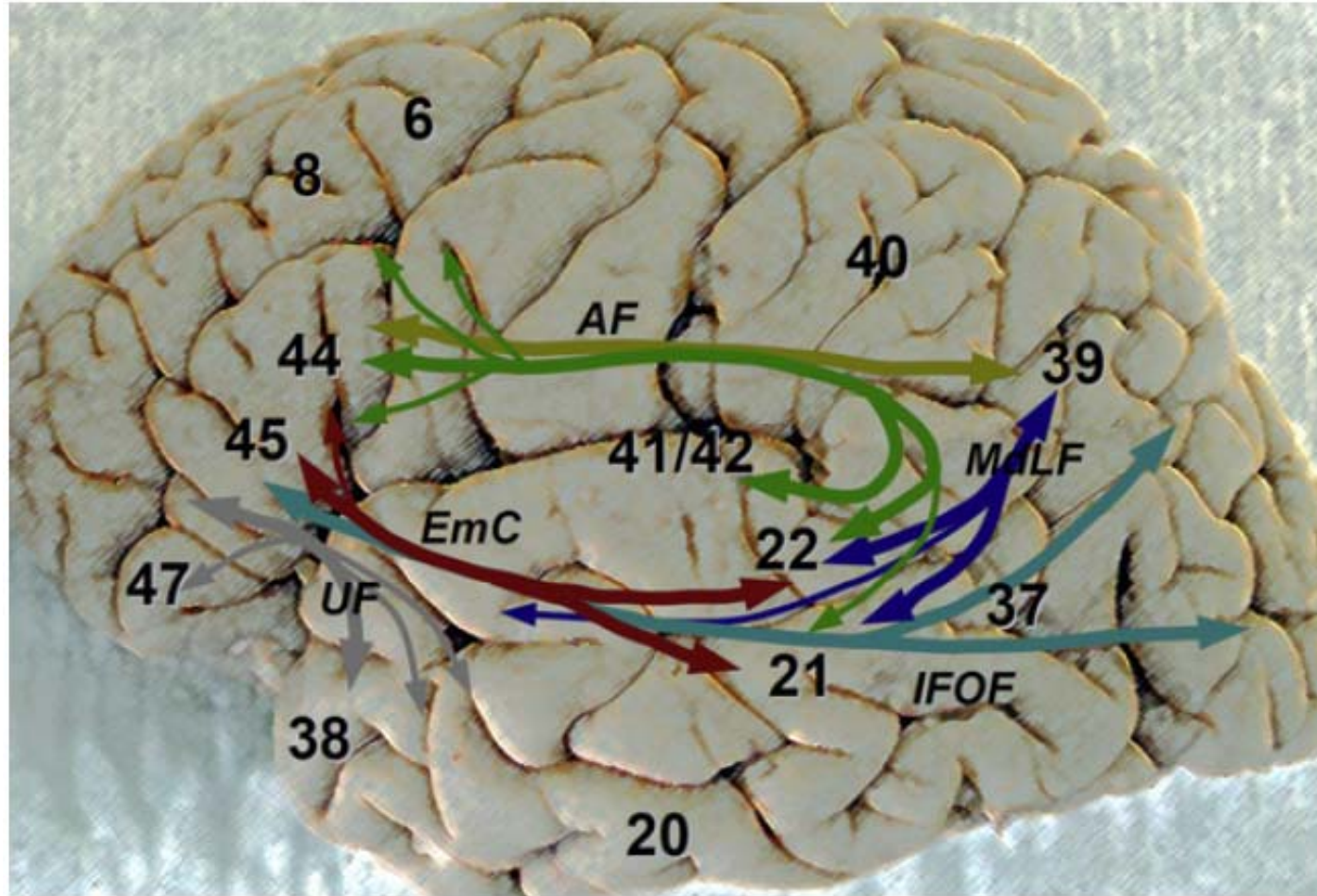
Les aires frontales et temporales impliquées dans le traitement du langage ont des profils semblables de densité de récepteurs

Zilles, K., Bacha-Trams, M., Palomero-Gallagher, N., Amunts, K., & Friederici, A. D. (2015). Common molecular basis of the sentence comprehension network revealed by neurotransmitter receptor fingerprints. *Cortex*, 63, 79–89.



Connectivité fronto-temporale des aires du langage

Axer, H., Klingner, C. M., & Prescher, A. (2013). Fiber anatomy of dorsal and ventral language streams. *Brain and Language*, 127(2), 192–204.



Trois principaux faisceaux de connexion fronto-temporale impliquant la « région de Broca »:

Faisceau arqué (*arcuate fasciculus*)

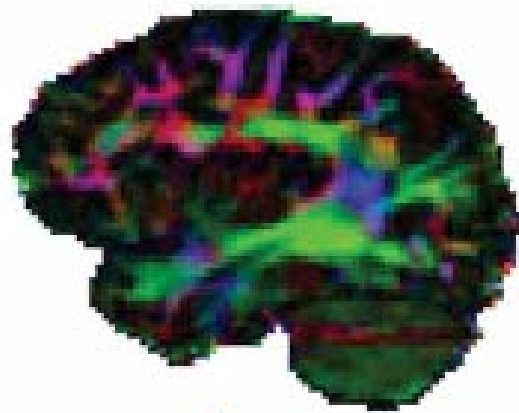
Capsule extrême

Faisceau unciné (*uncinate fasciculus*)

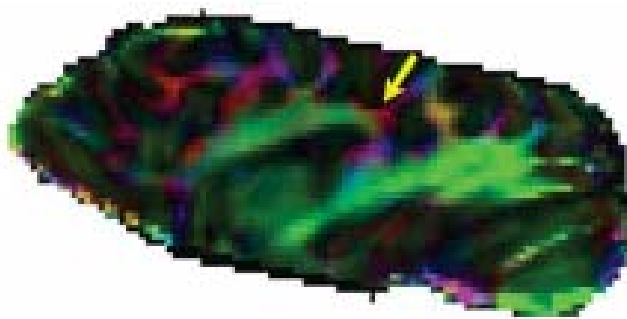
Fig. 4. Connectivity scheme of human language-related areas.

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

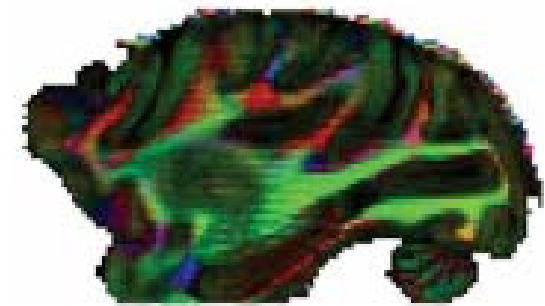
Rilling, J. K., Glasser, M. F., Preuss, T. M., Ma, X., Zhao, T., Hu, X., & Behrens, T. E. (2008). The evolution of the arcuate fasciculus revealed with comparative DTI. *Nat Neurosci*, 11(4), 426–8.



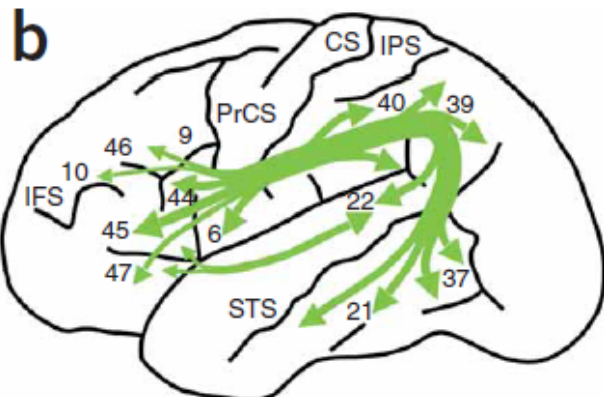
Human



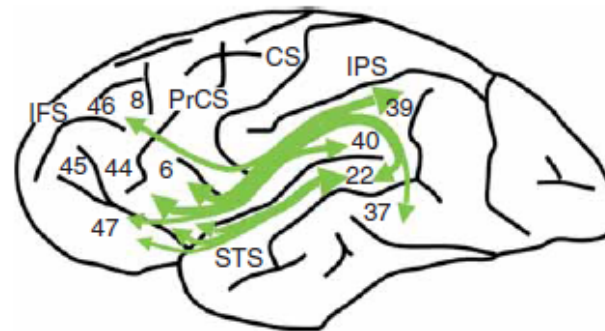
Chimpanzee



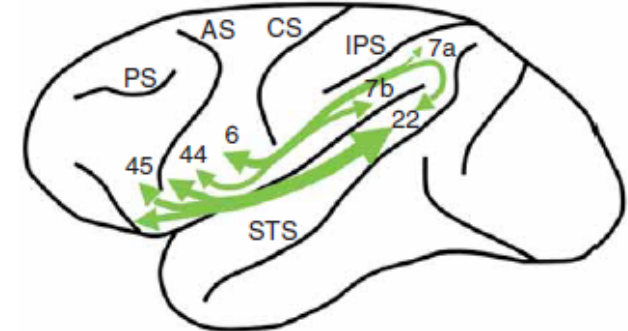
Macaque



Human



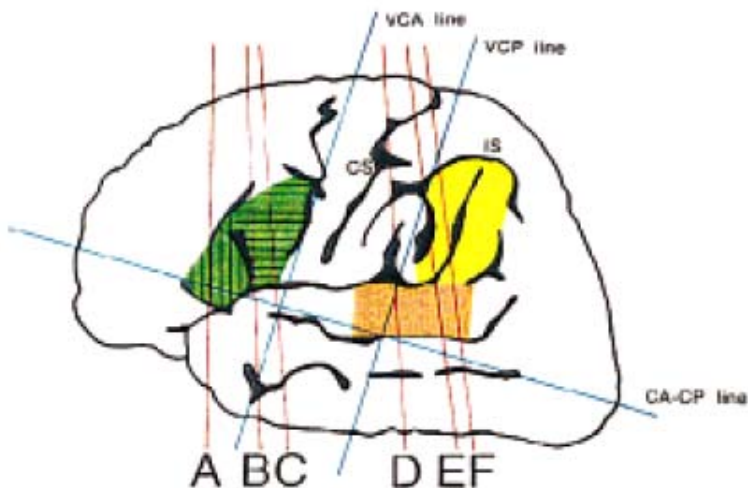
Chimpanzee



Macaque

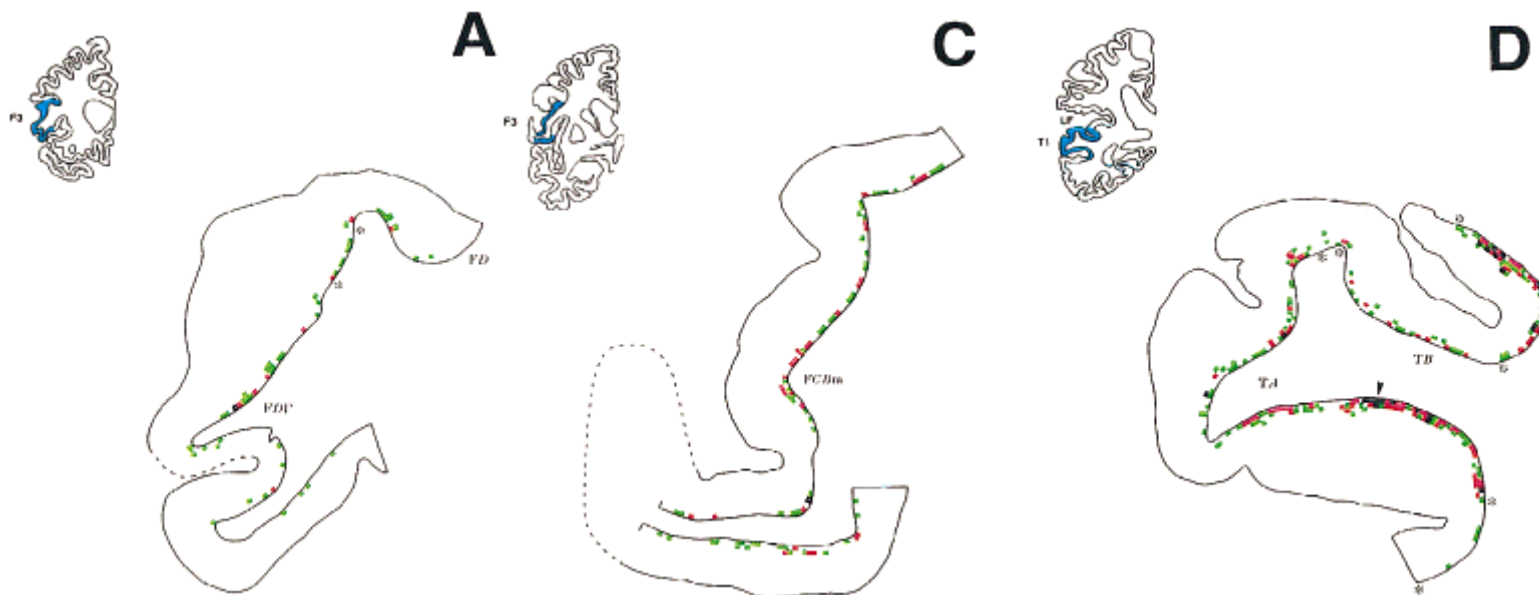
Les aires du langage reçoivent de nombreuses connexions à longue distance, y compris en provenance de l'hémisphère droit.

Di Virgilio, G., & Clarke, S. (1997). Direct interhemispheric visual input to human speech areas. *Hum Brain Mapp*, 5, 347–354.



Examen post-mortem des terminaisons, supposément monosynaptiques, dans l'hémisphère *gauche*, en provenance d'une petite région occipito-temporale de l'hémisphère *droit*.

Grande concentration de connexions vers les aires du langage: régions « de Broca » et « de Wernicke »

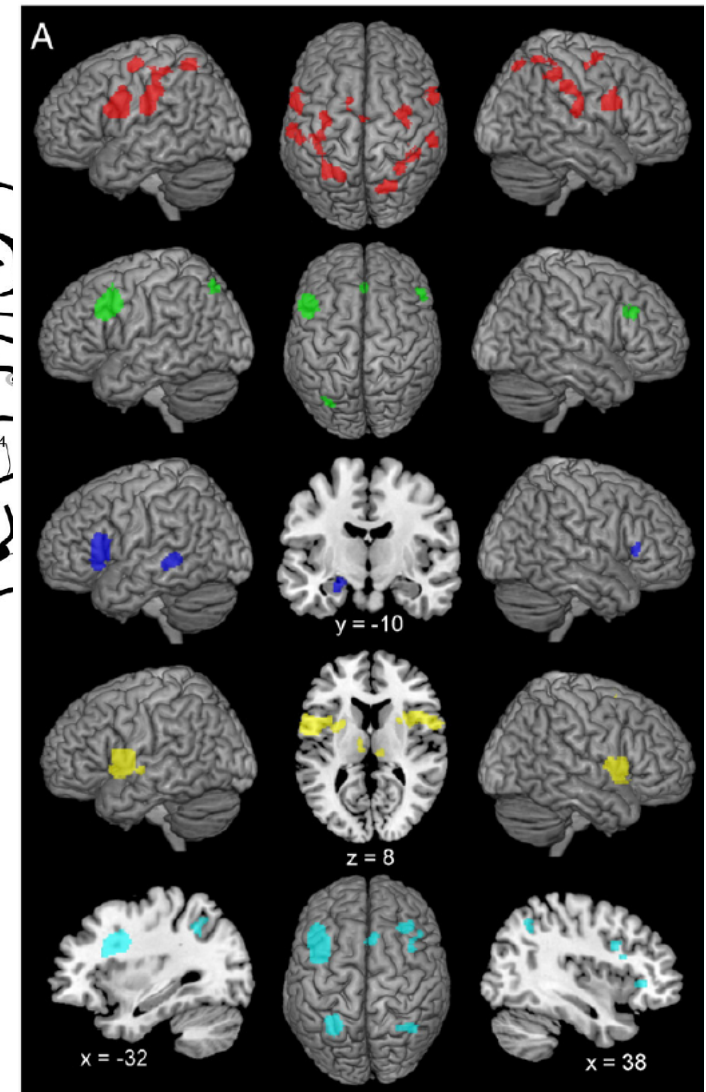
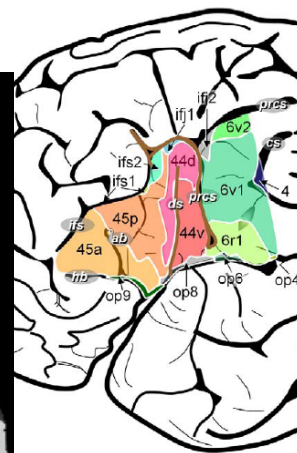
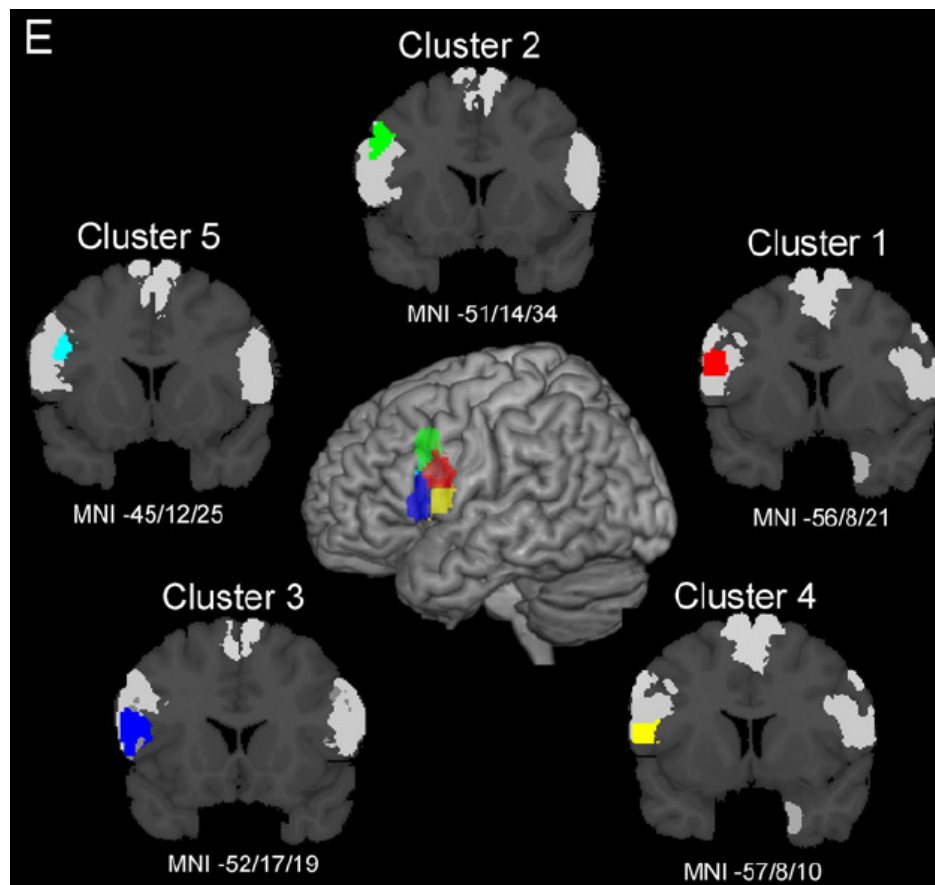


Parcellisation de l'aire 44 à partir de la connectivité fonctionnelle dans de nombreuses tâches.

Clos, M., Amunts, K., Laird, A. R., Fox, P. T., & Eickhoff, S. B. (2013). Tackling the multifunctional nature of Broca's region meta-analytically: Co-activation-based parcellation of area 44. *NeuroImage*, 83, 174–188.

Examen de la corrélation fonctionnelle de chaque voxel de l'aire 44 avec le reste du cerveau dans de très nombreuses tâches.

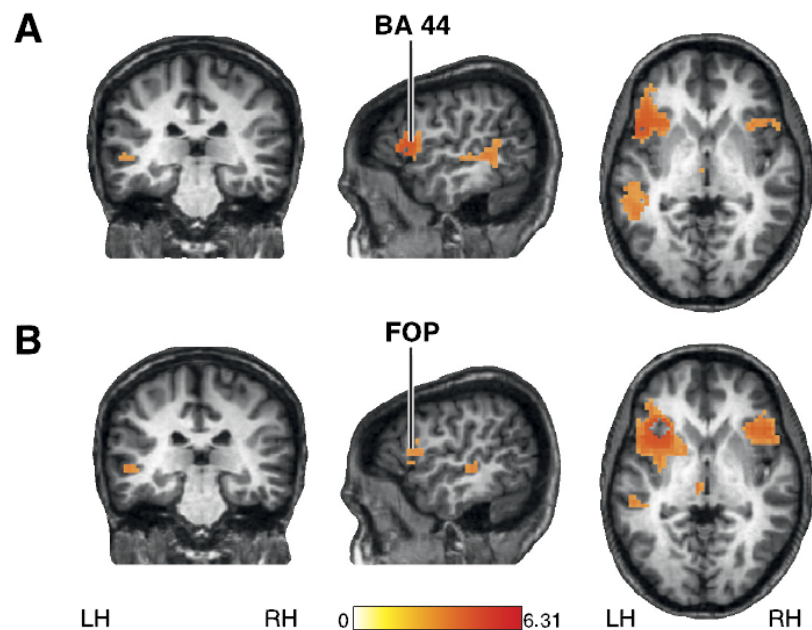
Subdivision en 5 « clusters » dont l'un (en bleu foncé), semble particulièrement associé au langage.



La connectivité fonctionnelle entre la région « de Broca » et la région temporale postérieure est propre au traitement du langage

Lohmann, G., Hoehl, S., Brauer, J., Danielmeier, C., Bornkessel-Schlesewsky, I., Bahlmann, J., ... Friederici, A. (2010). Setting the frame: the human brain activates a basic low-frequency network for language processing. *Cereb Cortex*, 20(6), 1286–92.

Réanalyse de 6 jeux de données dont 4 tâches linguistiques et 2 tâches non-linguistiques.
Examen de la « connectivité fonctionnelle » avec deux régions, l'une latérale dans l'aire 44, l'autre plus interne (operculum frontal)



Ces deux analyses pointent vers une région caractéristique située dans la partie postérieure du sillon temporal supérieur.

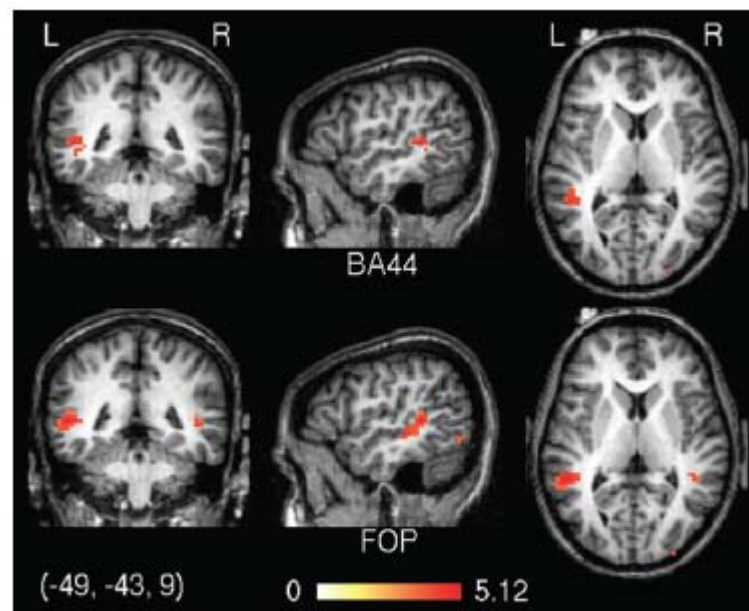


Figure 5. A second-level statistical map contrasting language versus nonlanguage experiments thresholded at $P < 0.05$ (FDR-corrected).

Cette corrélation fonctionnelle est significativement plus élevée dans des tâches linguistiques que dans des tâches non-linguistiques.

Peut-on identifier un circuit spécialisé pour la syntaxe?

Effet de l'ambiguïté syntaxique en IRM fonctionnelle

Tyler, L. K., Marslen-Wilson, W. D., Randall, B., Wright, P., Devereux, B. J., Zhuang, J., ... Stamatakis, E. A. (2011). Left inferior frontal cortex and syntax: function, structure and behaviour in patients with left hemisphere damage. *Brain*, 134, 415–31.

Ecoute de phrases présentant une ambiguïté syntaxique. Exemple 'bullying teenagers':

- Adjectif-Nom : 'The newspaper reported that bullying teenagers are a problem for the local school'
 - Verbe-Nom : 'The newspaper reported that bullying teenagers is bad for their self-esteem'
- + des phrases non-ambigües "The teacher knew that rehearsing plays is necessary for a good performance"

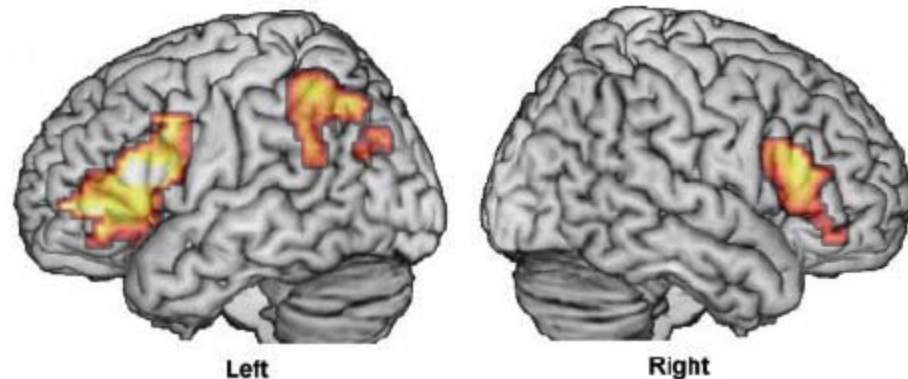
Effet principal de l'ambiguïté syntaxique (par rapport à des phrases non-ambigües):

Activation bilatérale du gyrus frontal inférieur (aire 45, s'étendant aux aires 44 et 47) et de la région pariétale inférieure gauche.

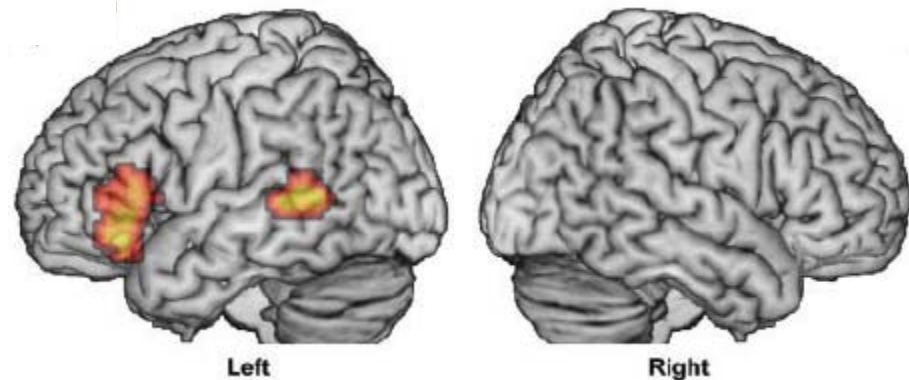
Effet additionnel de **révision de la structure syntaxique**:

- On détermine les préférences des sujets à percevoir le début comme A-N ou comme V-N
- On classe ensuite les phrases selon qu'elles correspondent à l'interprétation préférée ('dominante') ou moins évidente ('subordonnée')

A – Controls: ambiguous – unambiguous



D – Controls: subordinate – dominant



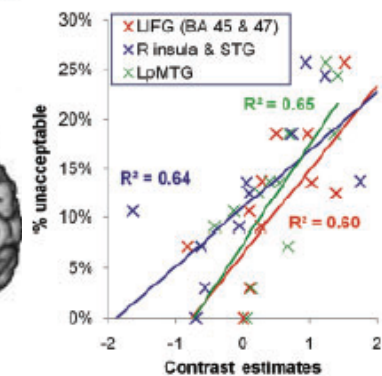
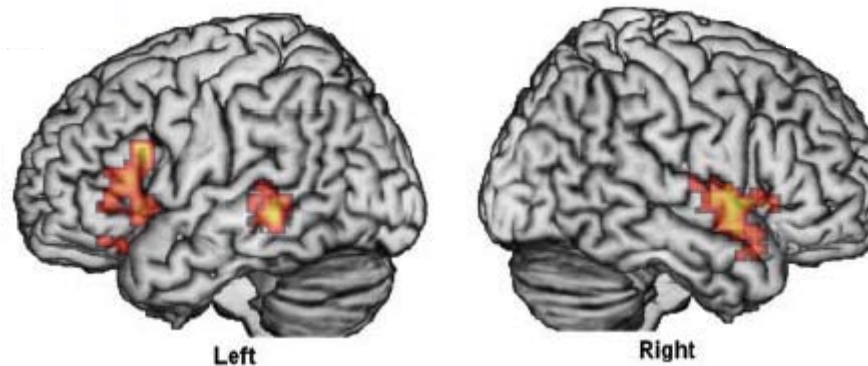
Effet de l'ambiguïté syntaxique en IRM fonctionnelle

Tyler, L. K., Marslen-Wilson, W. D., Randall, B., Wright, P., Devereux, B. J., Zhuang, J., ... Stamatakis, E. A. (2011). Left inferior frontal cortex and syntax: function, structure and behaviour in patients with left hemisphere damage. *Brain*, 134, 415–31.

Corrélation des performances des patients (jugement d'acceptabilité des mêmes phrases) avec les activations cérébrales :

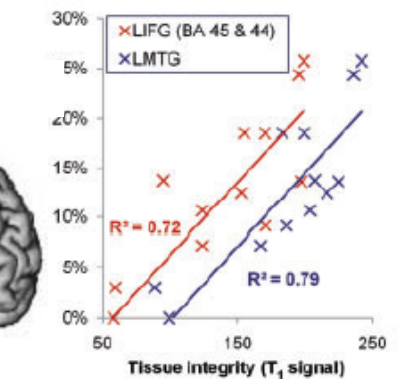
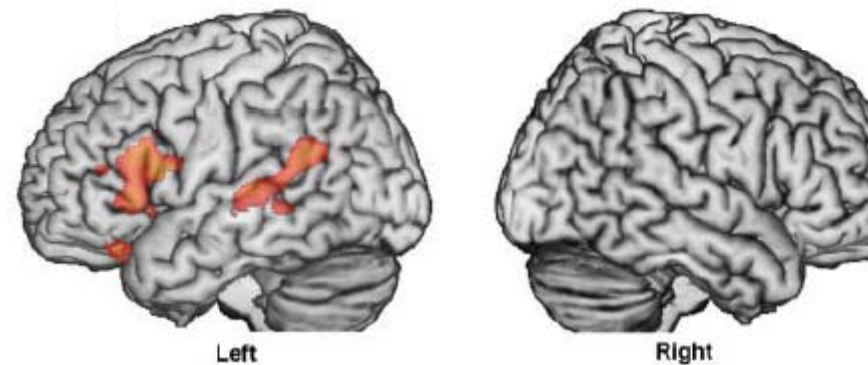
→ Gyrus frontal inférieur gauche (principalement aire 45) et de la partie postérieure du gyrus temporal moyen.

A – Patients, correlation of activity (ambiguous – unambiguous) and performance (acceptability task judgements, ambiguous – unambiguous)



On observe une corrélation similaire avec l'intégrité des tissus, mesurée par IRM anatomique.

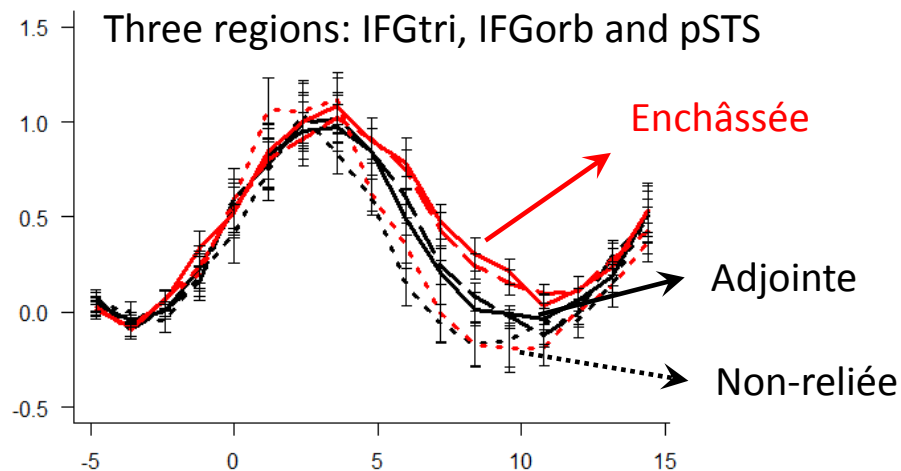
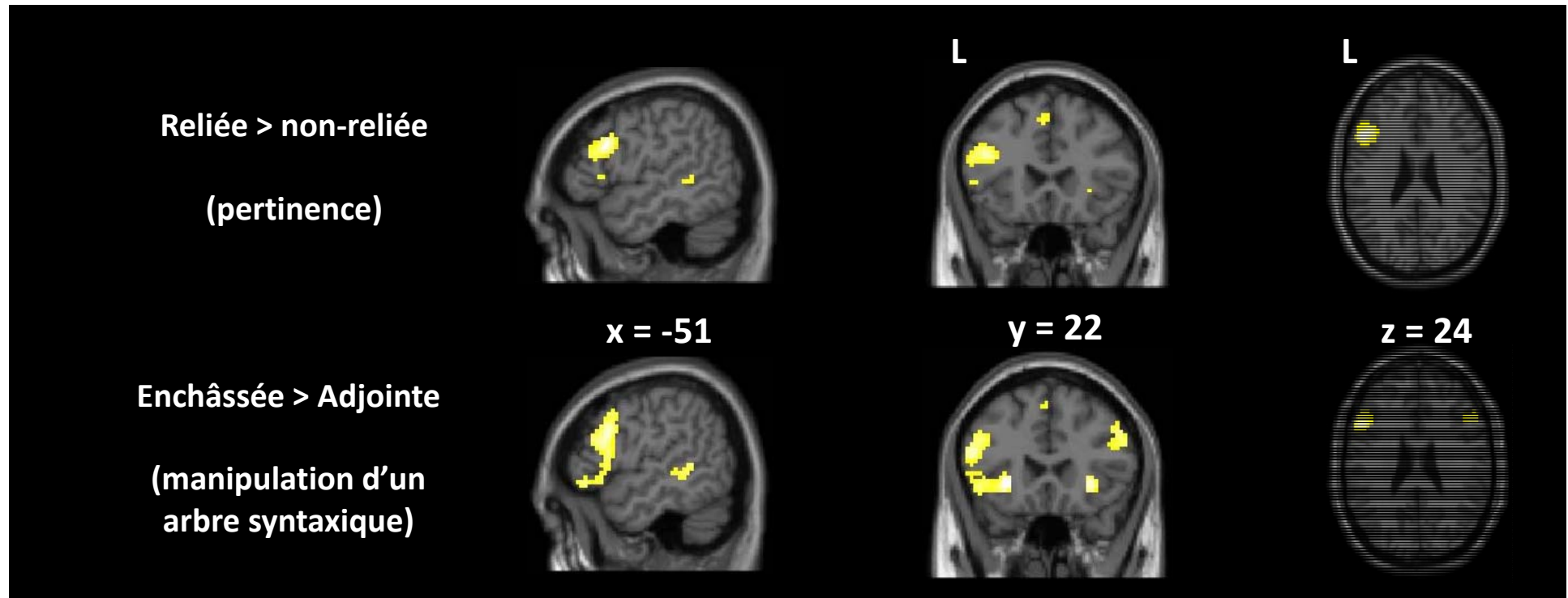
B – Patients, correlation of tissue integrity and performance (acceptability task judgements, ambiguous – unambiguous)



Conclusion: par-delà la simple corrélation, cette étude démontre que ces régions (contrairement à la région pariétale inférieure) jouent un rôle indispensable dans la construction des structures syntaxiques.

Un réseau cérébral pour la manipulation des arbres syntaxiques

Pattamadilok, Dehaene & Pallier, Cortex, 2016



Dynamique de l'activité cérébrale:

- Pas de différence pendant l'écoute de la phrase
- Les requêtes non-relées sont rejetées très vite.
- Augmentation d'activité pour toutes les requêtes reliées, mais particulièrement lorsqu'elles portent sur des propositions enchâssées.

Présence et nécessité d'un couplage fronto-temporal

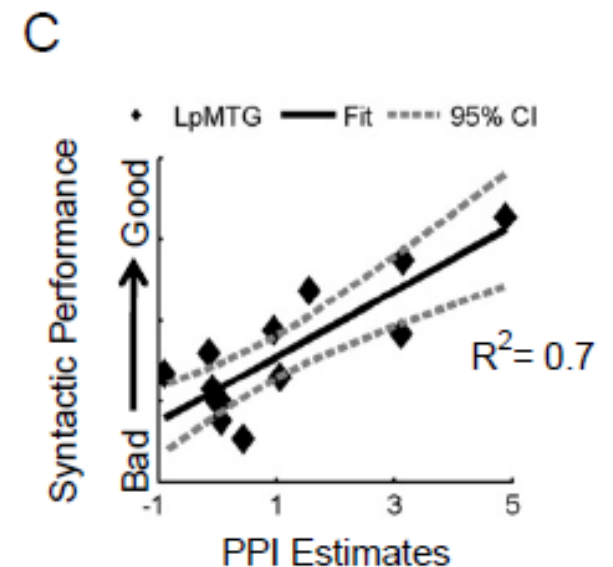
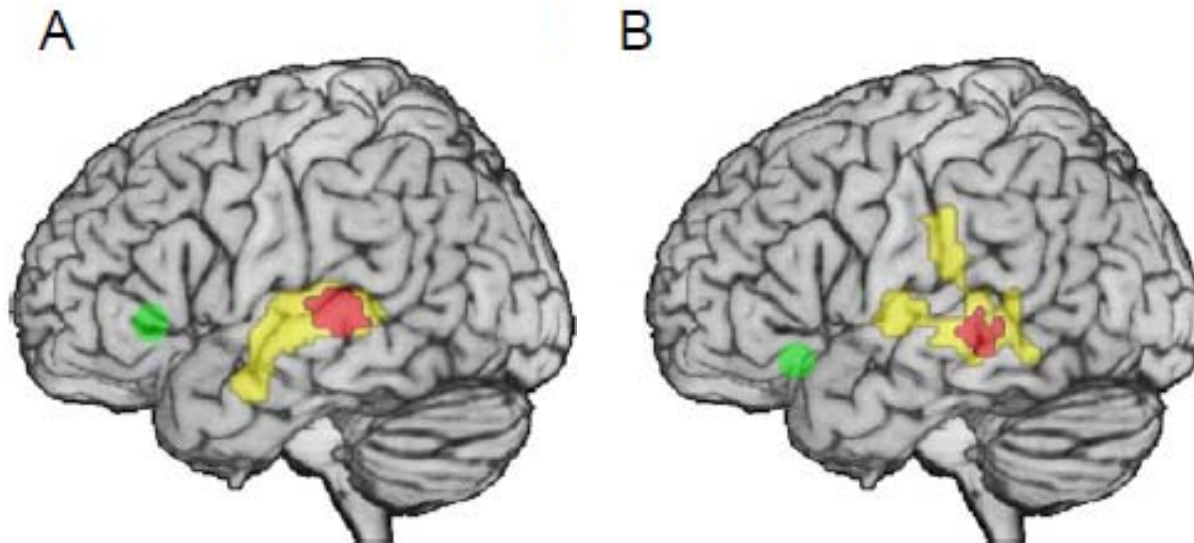
Papoutsis, M., Stamatakis, E. A., Griffiths, J., Marslen-Wilson, W. D., & Tyler, L. K. (2011). Is left fronto-temporal connectivity essential for syntax? Effective connectivity, tractography and performance in left-hemisphere damaged patients. *Neuroimage*, 58(2), 656–64.

Réanalyse par « connectivité fonctionnelle » des mêmes données.

Chez les contrôles, la corrélation fonctionnelle entre la région frontale inférieure et le gyrus temporal moyen augmente avec l'ambiguïté syntaxique.

Chez les patients, en moyenne, on observe une organisation similaire des corrélations.

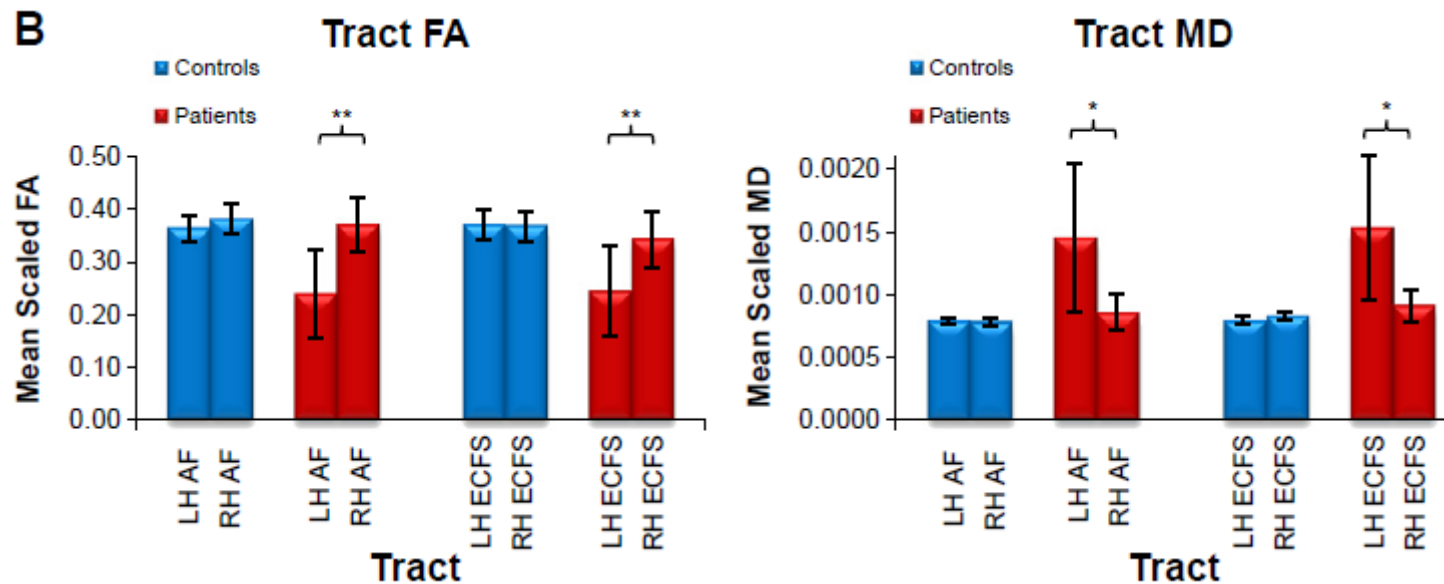
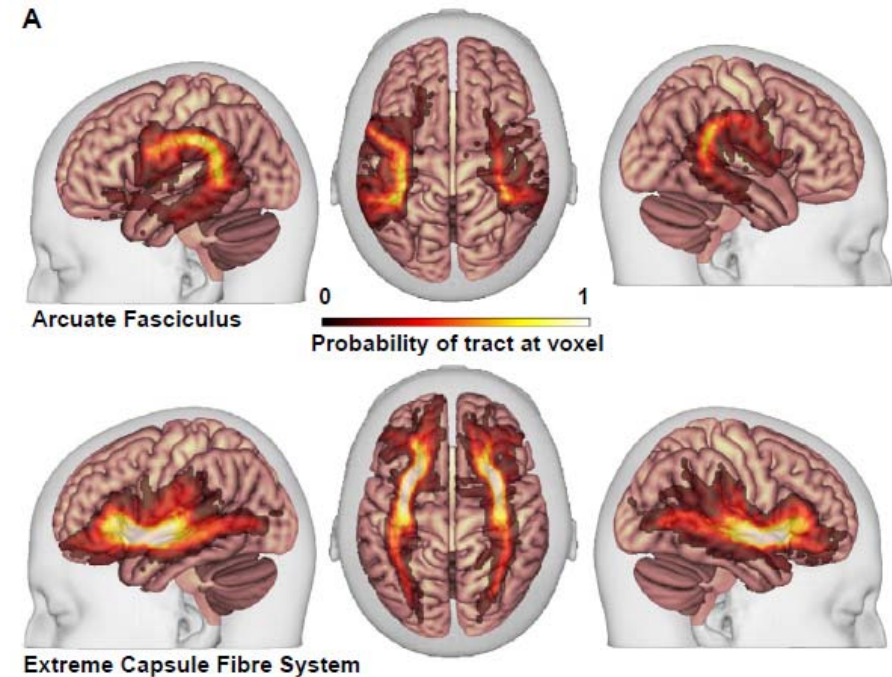
Cependant, la force de cette corrélation prédit la performance (dans la tâche d'acceptabilité syntaxique): les patients atteints de déficits syntaxiques sont précisément ceux chez qui le couplage fronto-temporal a disparu.



Rôle des faisceaux fronto-temporaux

Papoutsis, M., Stamatakis, E. A., Griffiths, J., Marslen-Wilson, W. D., & Tyler, L. K. (2011). Is left fronto-temporal connectivity essential for syntax? Effective connectivity, tractography and performance in left-hemisphere damaged patients. *Neuroimage*, 58(2), 656–64.

L'analyse de l'intégrité des faisceaux de connexion de la substance blanche montre que les *deux* faisceaux (faisceau arqué et capsule extrême) sont détériorés chez les patients atteints de déficits syntaxiques.



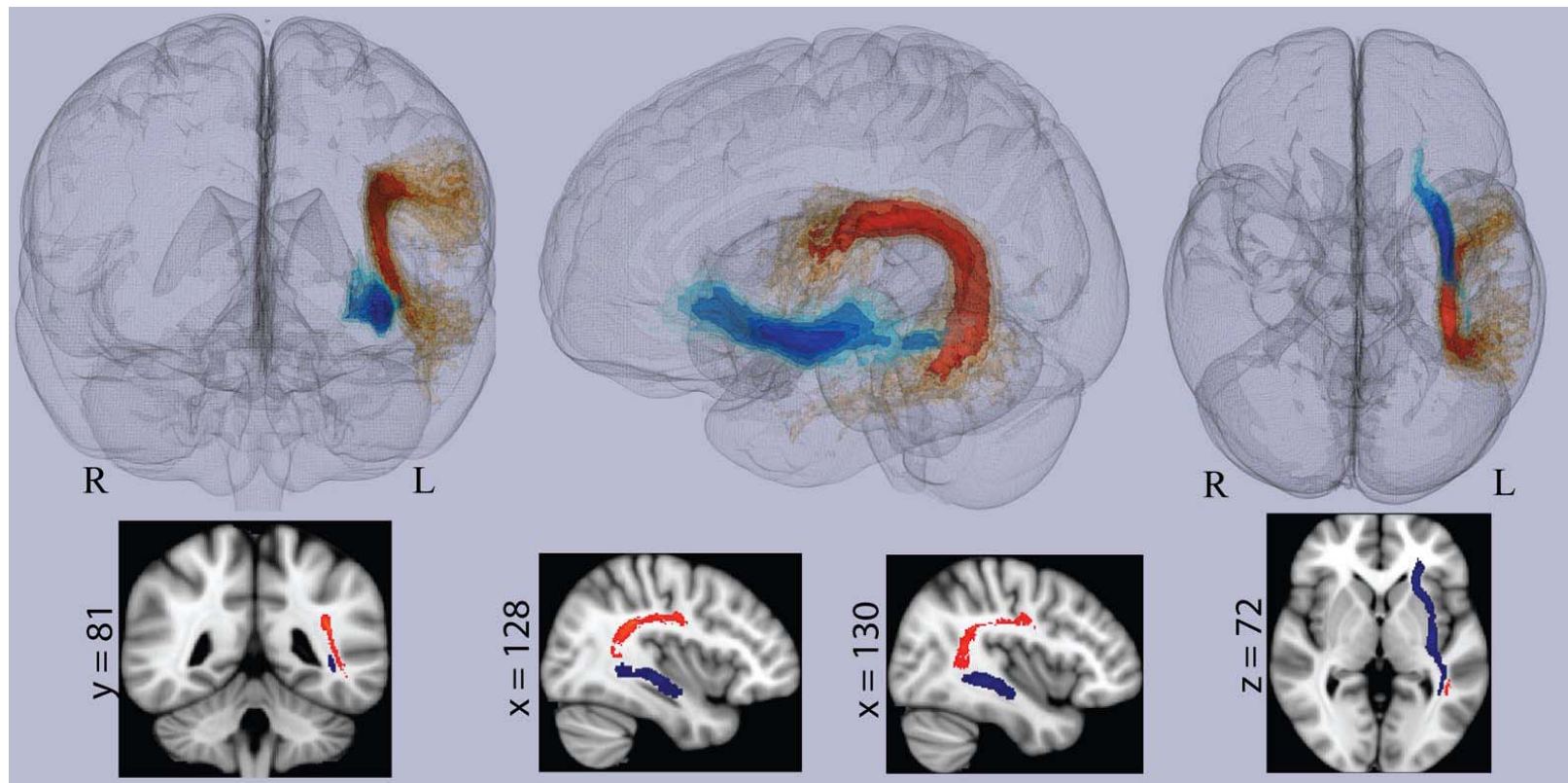
Rôles respectifs de ces deux faisceaux de connexion

Rolheiser, T., Stamatakis, E. A., & Tyler, L. K. (2011). Dynamic processing in the human language system: synergy between the arcuate fascicle and extreme capsule. *J Neurosci*, 31(47), 16949–57.

Etude de 24 patients droitiers avec des lésions de l'hémisphère gauche.

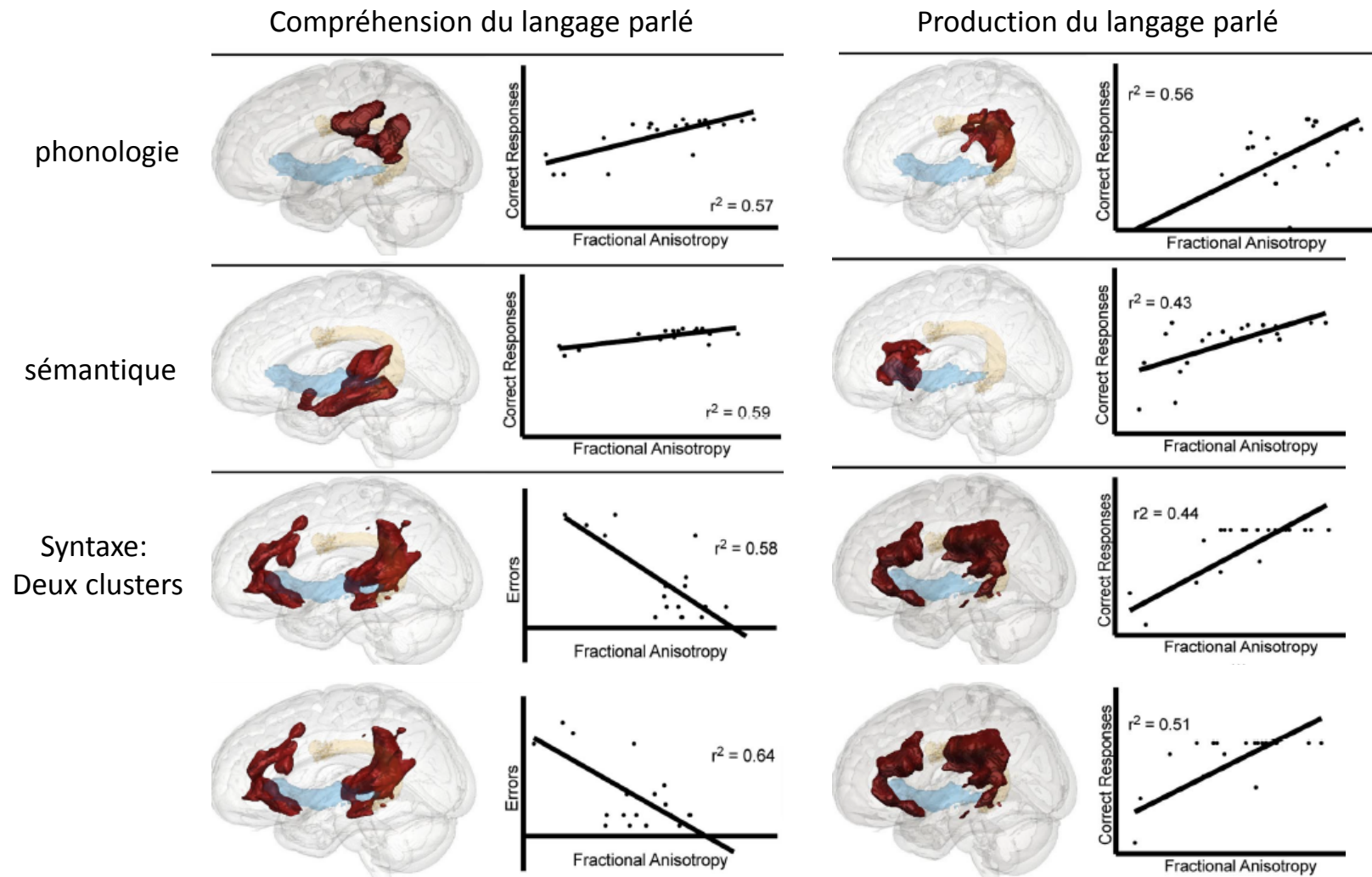
Batterie de tests évaluant, **en compréhension et production**, les compétences **phonologiques**, **morphologiques**, **syntaxiques** (comparaison phrase-image, répétition de phrases), et **sémantiques**.

IRM de diffusion et calcul de l'anisotropie fractionnelle en chaque point, avec masques définissant la probabilité qu'un voxel se trouve dans le faisceau arqué ou dans la capsule extrême.



Principaux résultats :

- Les tâches phonologiques reposent sur l'intégrité du faisceau arqué.
- Les tâches sémantiques reposent sur l'intégrité de la capsule extrême.
- Les compétences syntaxiques exigent l'intégrité de ces deux faisceaux.

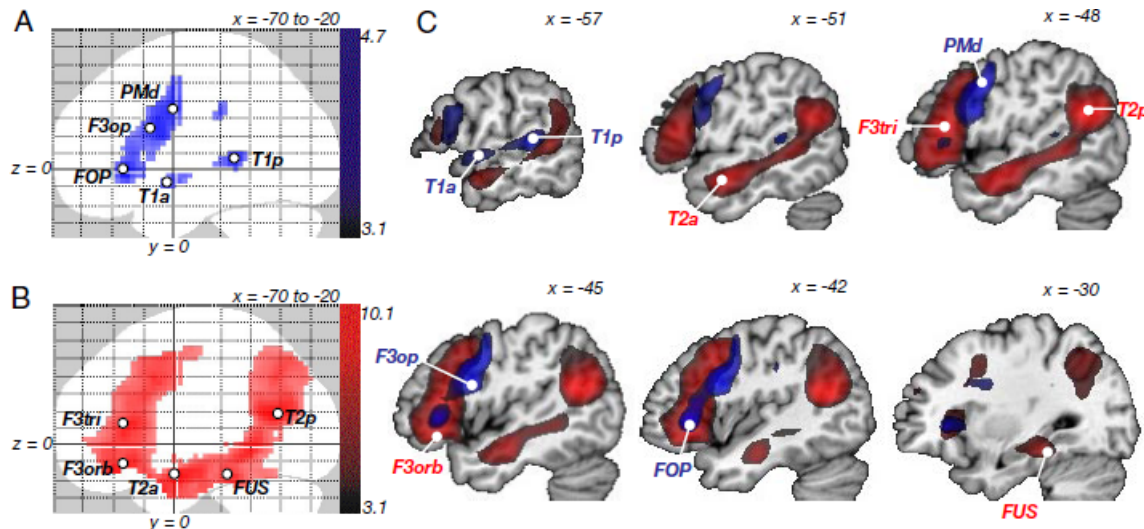


Une tentative de séparation entre voie dorsale et voie ventrale pour le traitement de la phonologie des mots et du sens des phrases

Saur, D., Kreher, B. W., Schnell, S., Kümmerer, D., Kellmeyer, P., Vry, M.-S., ... Weiller, C. (2008). Ventral and dorsal pathways for language. *PNAS*, 105(46), 18035–18040.

IRM fonctionnelle:

- Soustraction 1: répétition de pseudomots ou de mots
- Soustraction 2: écoute de phrases ou de pseudo-phrases



IRM de diffusion:

Tractographie à partir des régions observées en IRMf

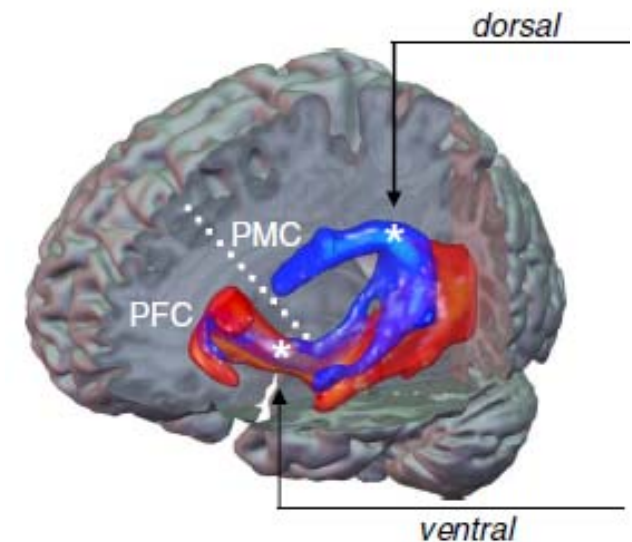


Fig. 1. fMRI results. Functional networks involved in (A) repetition (of pseudowords compared with words) and (B) comprehension (listening to normal sentences compared to meaningless pseudo sentences), analyzed in two random effects analyses (no. = 33). Activations are overlaid as maximum intensity projections (MIP; x , -70 to -20) on a canonical brain. Peak voxels within each cluster defined the nodes of the networks, which served as seed regions for the probabilistic fiber tracking. (C) Both contrasts (repetition, blue; comprehension, red) displayed along the x coordinate of the seed regions. Statistical threshold was set at $P < 0.001$, uncorrected. T1a/p, anterior/posterior superior temporal gyrus; T2a/p, anterior/posterior middle temporal gyrus; FUS, fusiform gyrus; F3orb/tri/op, pars orbitalis/triangularis and opercularis of the inferior frontal gyrus; FOP, deep frontal operculum; PMd, dorsal premotor cortex.

Conclusions:

- La voie dorsale (faisceau arqué) serait particulièrement impliquée dans la reconnaissance des sons du langage et leur mise en relation avec les programmes articulatoires.
- La voie ventrale (capsule extrême) serait plus impliquée dans le calcul du sens des phrases.

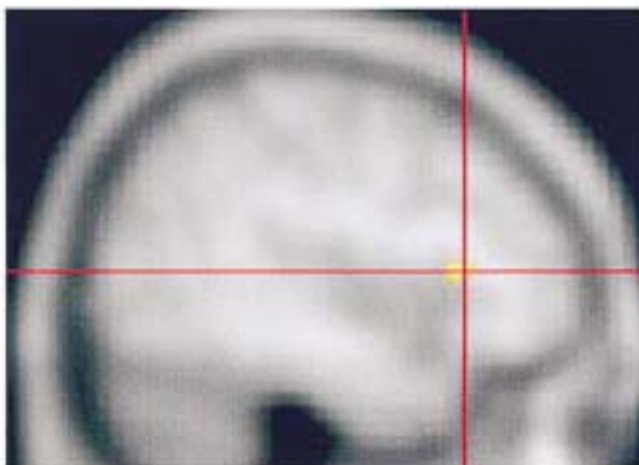
Au sein des phrases: Dissociation entre syntaxe et sémantique

Dapretto, M., & Bookheimer, S. Y. (1999). Form and content: dissociating syntax and semantics in sentence comprehension. *Neuron*, 24(2), 427–32.

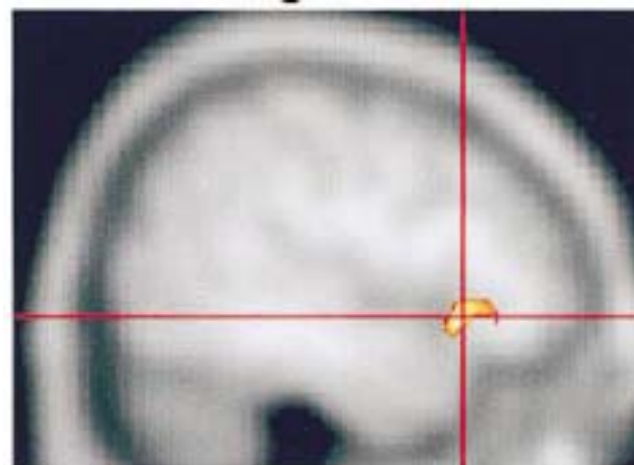
Ecoute de paires de phrases avec, soit une relation syntaxique, soit une relation sémantique:

Table 1. Examples of Stimuli Used in the Syntactic and Semantic Conditions

Syntactic Condition	Semantic Condition	
"The policeman arrested the thief" "The thief was arrested by the policeman"	"The lawyer questioned the witness" "The attorney questioned the witness"	same
"The teacher was outsmarted by the student" "The teacher outsmarted the student"	"The man was attacked by the doberman" "The man was attacked by the pitbull"	different
"The pool is behind the gate" "Behind the gate is the pool"	"The car is in the garage" "The auto is in the garage"	same
"West of the bridge is the airport" "The bridge is west of the airport"	"East of the city is the lake" "East of the city is the river"	different



syntaxe > sémantique: Aire 44



sémantique > syntaxe: Aire 47

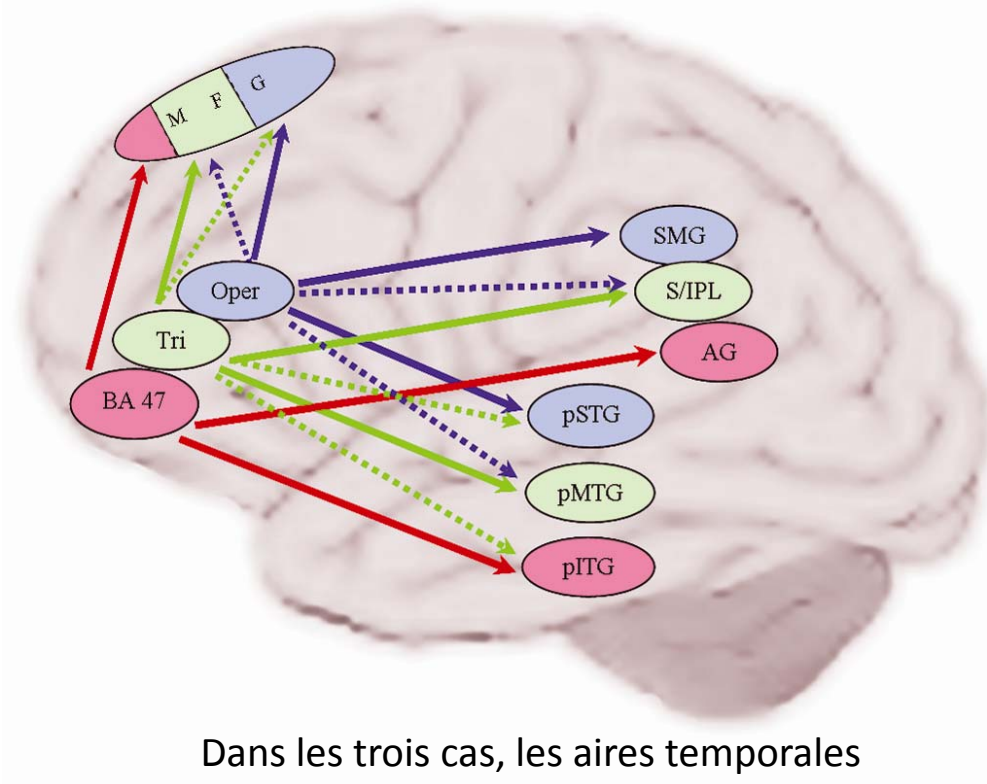
Quels rôles respectifs pour les régions temporales et préfrontales?

Le modèle de Hagoort: « Memory, Unification, Control »

Hagoort, P. (2013). MUC (Memory, Unification, Control) and beyond. *Frontiers in Psychology*, 4

Les aires du langage contiennent des circuits parallèles pour trois niveaux de représentation combinatoire du langage: phonologie, syntaxe et sémantique.

Différentes régions du cortex frontal inférieur contribueraient à l'**unification** (*merge?*) de ces objets en arbres cohérents.



Dans les trois cas, les aires temporales contiendraient des répertoires d'objets mémorisés.

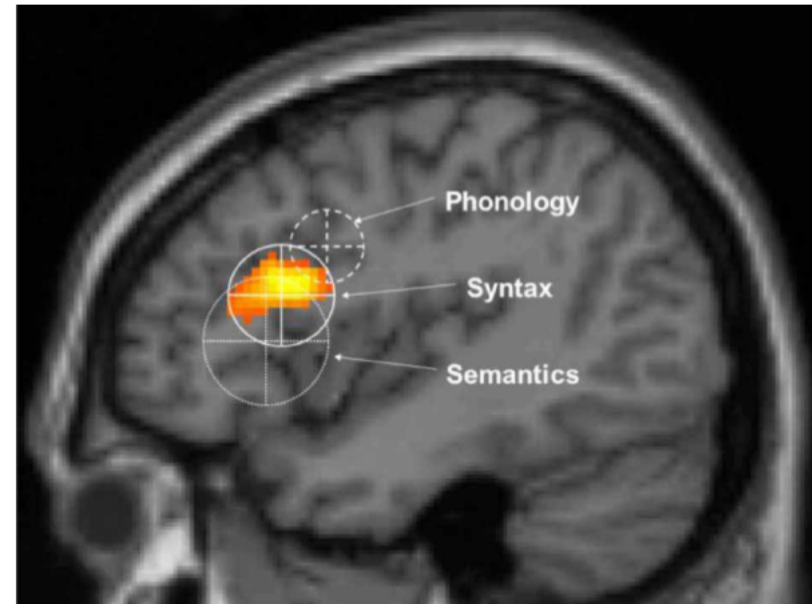
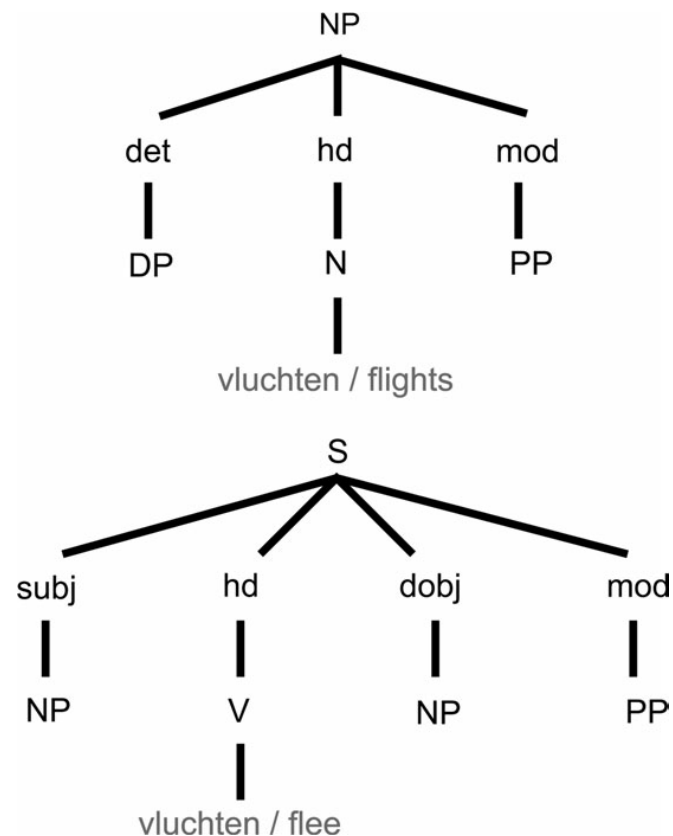


FIGURE 3 | The unification gradient in left inferior frontal cortex. Activations and their distribution are shown, related to semantic, syntactic and phonological processing. Regions are based on the meta-analysis in Bookheimer. The centers represent the mean coordinates of the local maxima, the radii represent the standard deviations of the distance between the local maxima and their means. The activation shown is from artificial grammar violations in Petersson et al. (2004) (courtesy of Karl Magnus Petersson).

Tentative de mise à l'épreuve du modèle: Dissociation entre lexique syntaxique et unification

Snijders, T. M., Vosse, T., Kempen, G., Van Berkum, J. J. A., Petersson, K. M., & Hagoort, P. (2009). Retrieval and unification of syntactic structure in sentence comprehension: an fMRI study using word-category ambiguity. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 19(7), 1493–1503.

Modèle « lexicaliste » de la syntaxe:
Chaque mot connu dispose d'une entrée (*syntactic frame*) dans un lexique syntaxique, sous la forme d'un mini-arbre (*treelet*):



Le cortex préfrontal inférieur servirait à *unifier* ces petits arbres au sein de la phrase.

Manipulation expérimentale de l'ambiguïté syntaxique :

Les sujets lisent des phrases et des listes de mots qui contiennent des mots dont la catégorie syntaxique est ambiguë (noms ou verbes).

Exemples (en hollandais):

- Beide vluchten werden geannuleerd (“both flights were cancelled”)
- Beide vluchten het behekste (“both flee the bewitched house”)

Logique:

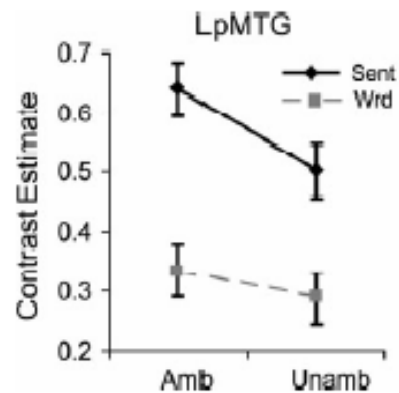
- Les régions impliquées dans le lexique syntaxique devraient montrer plus d'activité pour les mots ambigus.
- Mais les régions impliquées dans l'unification ne devraient montrer cet effet qu'au sein des phrases, pas au sein des listes de mots.

Dissociation entre lexique syntaxique et unification

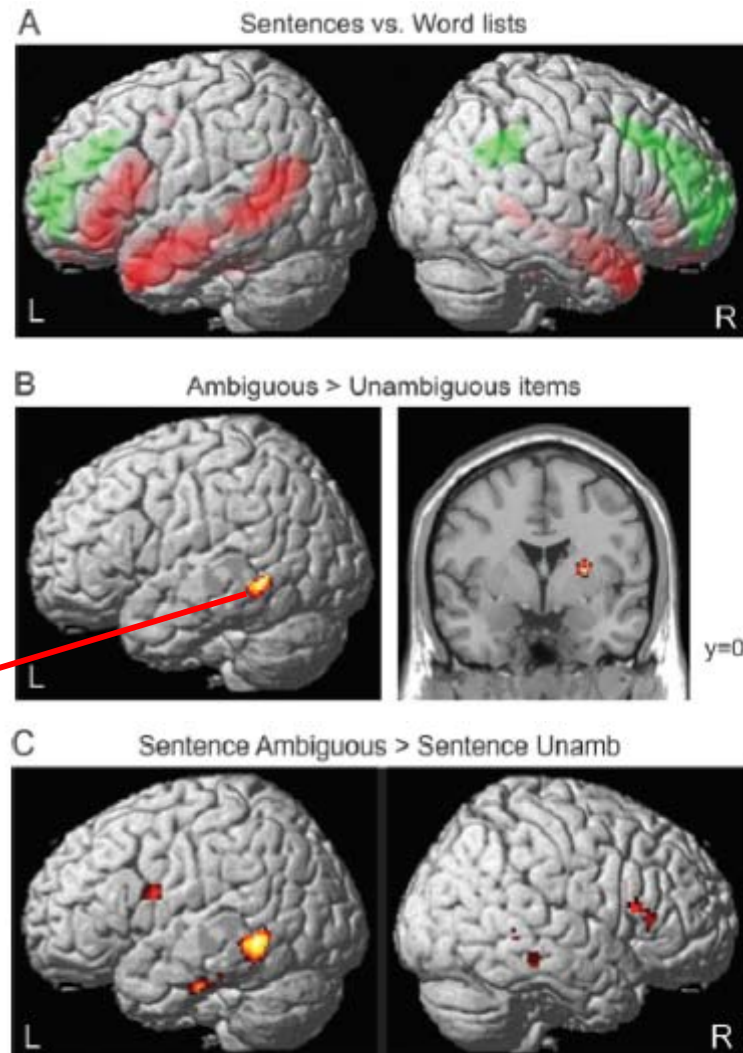
Snijders, T. M., Vosse, T., Kempen, G., Van Berkum, J. J. A., Petersson, K. M., & Hagoort, P. (2009). Retrieval and unification of syntactic structure in sentence comprehension: an fMRI study using word-category ambiguity. *Cerebral Cortex*, 19(7), 1493–1503.

Résultats:

- Vaste réseau classique pour phrases > listes de mots
- Pour les listes: Effet d'ambiguïté lexicale dans le gyrus temporal moyen gauche (+striatum droit+...)
- Pour les phrases: Effet d'ambiguïté s'étendant à la région frontale inférieure gauche.



Gyrus temporal moyen [-52 -50 -8]



Critiques:

- l'effet est faible: l'interaction n'est significative que si on se restreint à la région d'intérêt.
- l'interaction entre régions n'est pas testée.

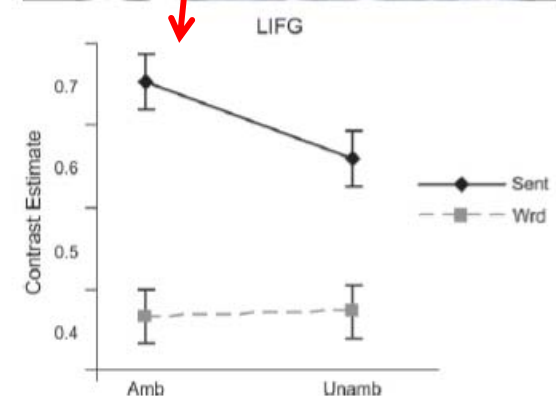


Figure 2. ROI results. Mean contrast estimates for LIFG for SA, SU, WA, and WU. The ROI used is shown on top (13 mm sphere around coordinates [-44,19,14]).

Dissociation entre lexique syntaxique et unification

Snijders, T. M., Petersson, K. M., & Hagoort, P. (2010). Effective connectivity of cortical and subcortical regions during unification of sentence structure. *NeuroImage*, 52(4), 1633–1644.

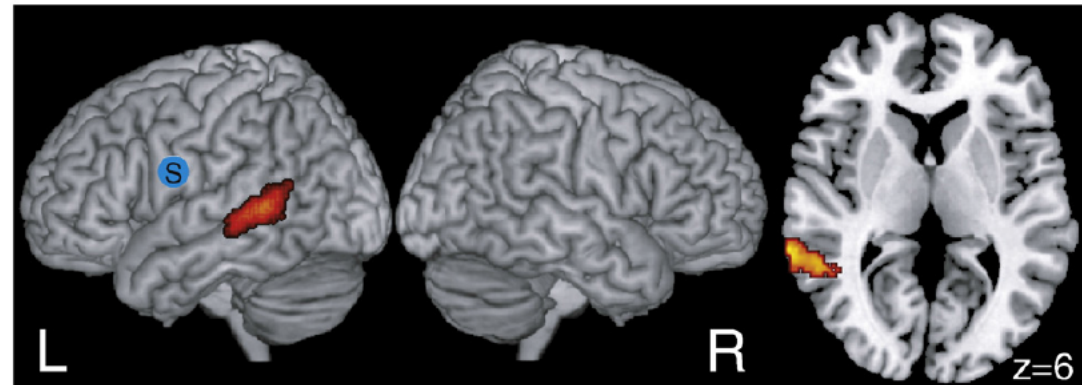
Analyse de la connectivité fonctionnelle dans les mêmes données:

- À partir de la région frontale inférieure gauche, couplage augmenté avec le cortex temporal en cas d'ambiguïté, *uniquement pour les phrases (S)*

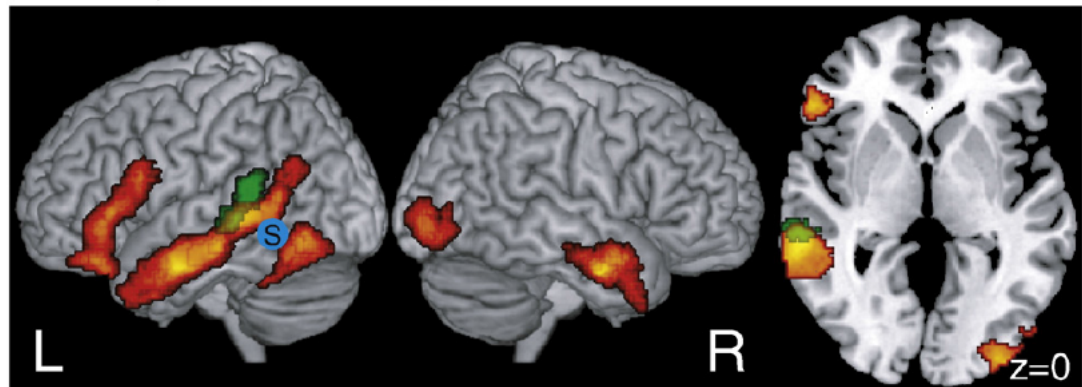
- À partir de la région temporal moyenne postérieure, couplage:

- Local au lobe temporal en cas d'ambiguïté dans la condition de listes de mots
- Global aux régions du langage en cas d'ambiguïté dans la condition de phrases.

A Seed LpIFG; PPI SA>SU



B Seed LpMTGi; PPI SA>SU; PPI WA>WU



Micro-décomposition des aires du langage: Des sous-régions spécialisées pour les rôles thématiques

Frankland, S. M., & Greene, J. D. (2015). An architecture for encoding sentence meaning in left mid-superior temporal cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 201421236.

Expérience 1: Décodage, en IRM fonctionnelle, de six catégories de phrases écrites qui (1) font appel aux mêmes mots dans un ordre différent; (2) peuvent être énoncées à la voix active ou passive.

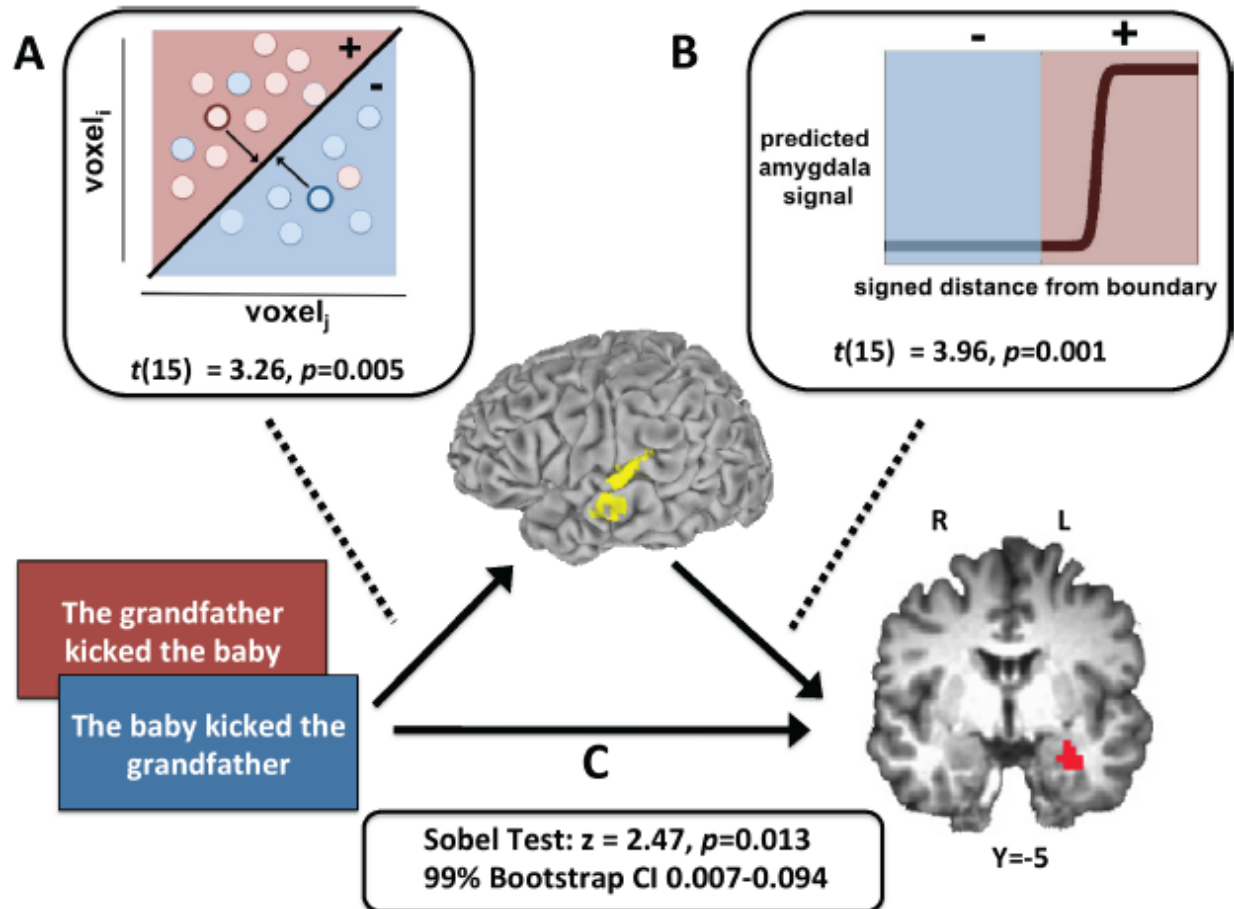
Exemple:

- "The baby kicked the grandfather"
 - "The grandfather kicked the baby"
 - et leurs formes passives.
- (permet de distinguer rôle thématique et fonction syntaxique).

Une recherche systématique (*searchlight*) identifie une petite région temporale gauche dont la configuration d'activité prédit le sens de la proposition.

De plus, l'amygdale corrèle avec le degré de classification, par la région temporale, de la version « émouvante » de la phrase.

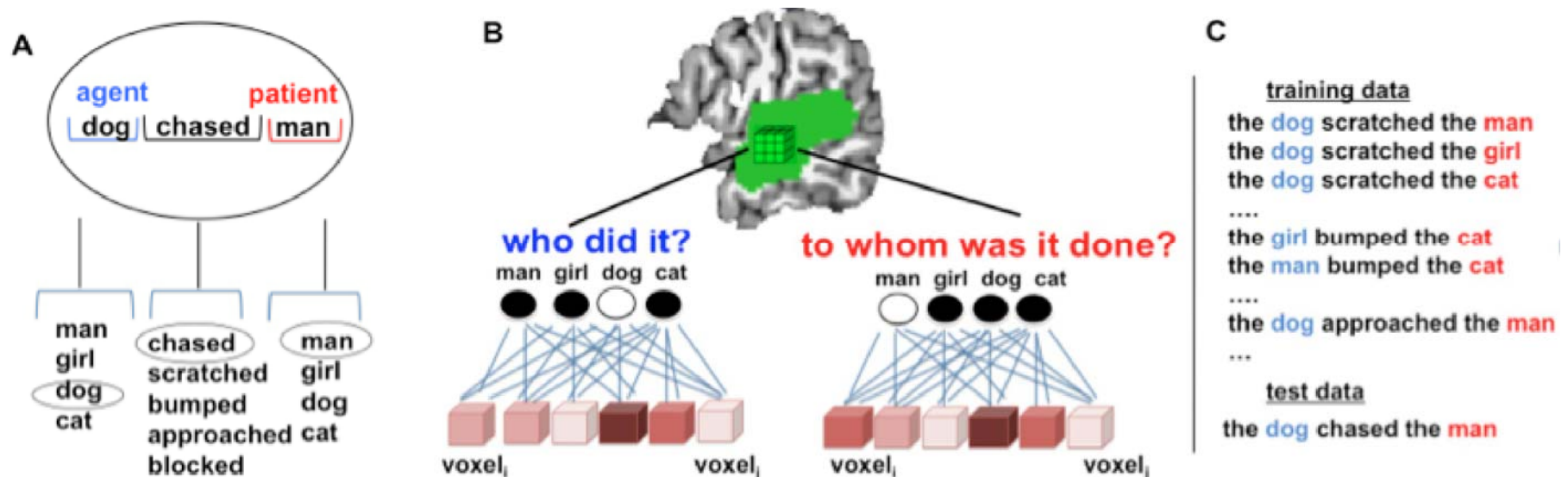
→ Représentation du sens de la phrase entière, ou bien de ses rôles thématiques?



Décodage du rôle thématique: qui est l'agent, qui est le patient?

Frankland, S. M., & Greene, J. D. (2015). An architecture for encoding sentence meaning in left mid-superior temporal cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 201421236.

Expérience 2: Présentation, à la voix active et passive, de toutes les combinaisons possibles de quatre agents, quatre patients (les mêmes), et cinq verbes.



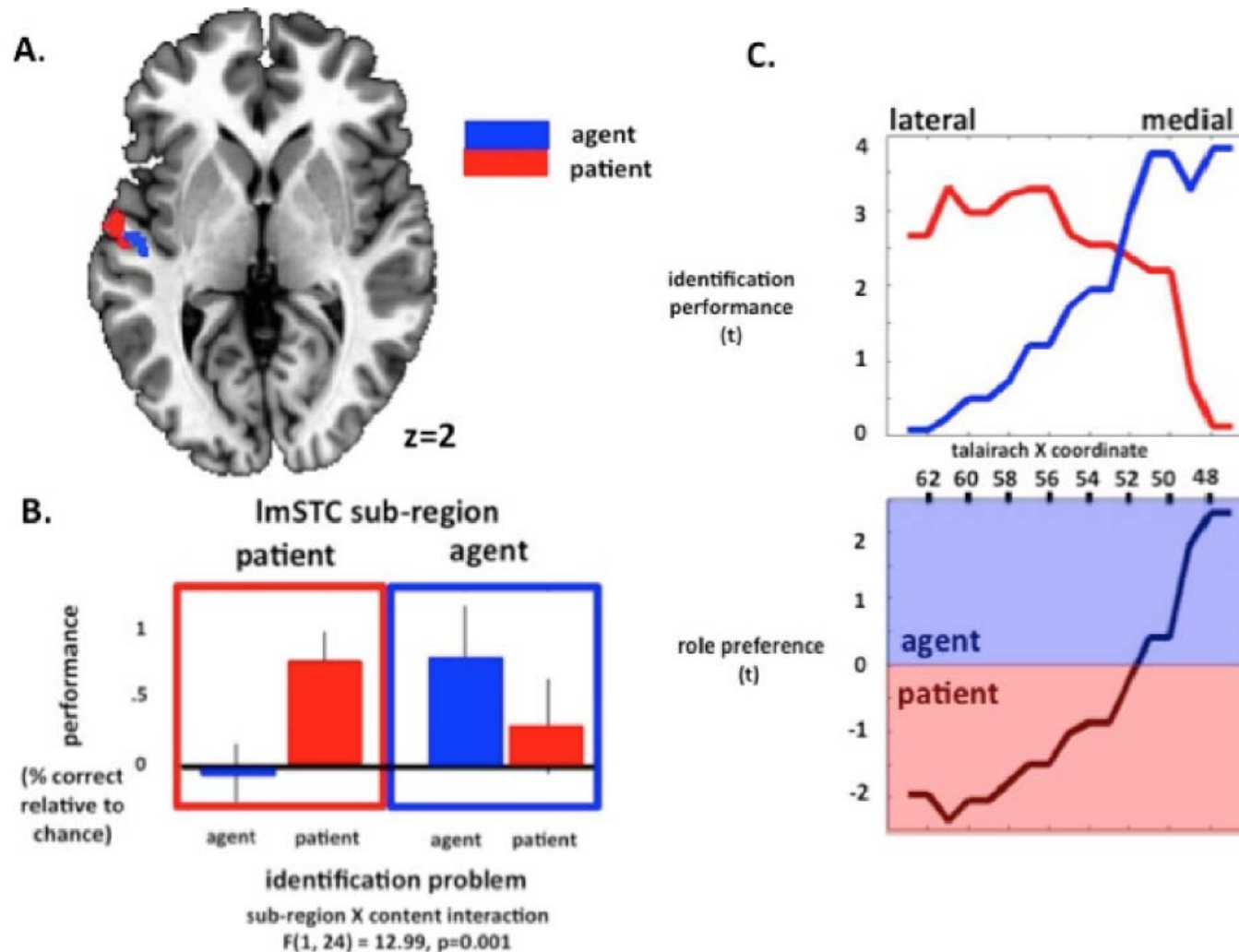
Deux classificateurs multivariés (à quatre classes) sont entraînés à décoder respectivement quel est l'agent de la proposition, ou quel est le patient, sur la base de la configuration d'activité dans un groupe 3x3x3 de voxels que l'on déplace en tout point du cerveau (*searchlight*).

(Des décodeurs similaires pour le sujet ou l'objet de la phrase n'ont rien donné.)

Décodage du rôle thématique: qui est l'agent, qui est le patient?

Frankland, S. M., & Greene, J. D. (2015). An architecture for encoding sentence meaning in left mid-superior temporal cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 201421236.

Résultats: deux petites régions voisines, mais disjointes, permettent de décoder respectivement l'agent et le patient de la proposition.

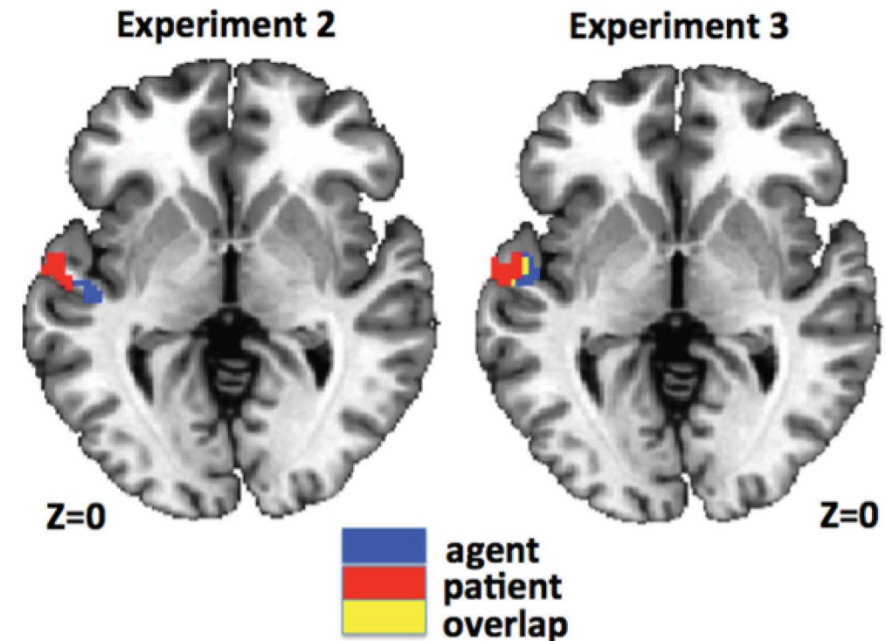


Décodage du rôle thématique: qui est l'agent, qui est le patient?

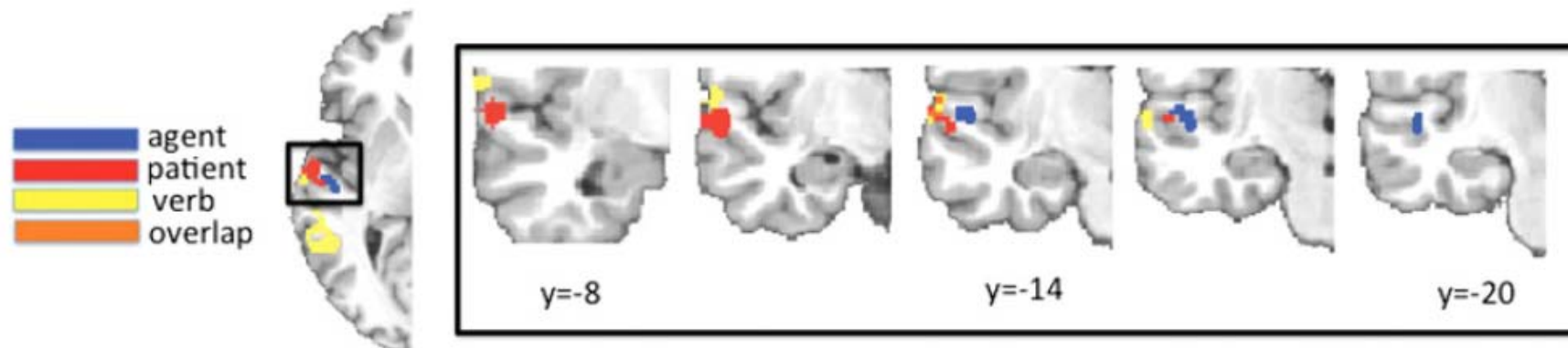
Frankland, S. M., & Greene, J. D. (2015). An architecture for encoding sentence meaning in left mid-superior temporal cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 201421236.

Les taux de classification sont très faibles (26-28%), mais significatifs, et les résultats sont répliqués dans une troisième expérience.

Il est également possible de décoder l'identité du verbe, à la fois dans une région très voisine et dans une région temporale supérieure postérieure (également impliquée dans la discrimination de l'agent).



Identification problem	Center coordinates (Talairach)
Agent	-46, -18, 1 -57, -37, 7
Patient	-57, -10, 2
Verb	-61, -15, 2 -55, -49, 5



Conclusions

Le réseau des aires du langage peut se décomposer en sous-régions spécialisées.

- Sur le plan architectonique
- Sur le plan des récepteurs impliqués et de leur distribution (même si l'ensemble des aires du langage partage une « signature » particulière de récepteurs)
- Sur le plan fonctionnel:
- Il existe un « cœur » de régions spécialisées dans les opérations syntaxiques (IFG oper/tri + région temporale supérieure postérieure)
- Ce « cœur syntaxique » est entouré d'autres régions impliquées dans le traitement phonologique ou sémantique.
- Hypothèse plausible et intéressante: tous ces réseaux (auquel s'ajoute un réseau mathématique dorsal) pourraient avoir changé simultanément au cours de l'évolution, et acquis une capacité d' « unification » qui permet la formation d'arbres enchâssés.

