

**Cours 2015:**

**Représentation cérébrale des structures linguistiques**

Stanislas Dehaene

Chaire de Psychologie Cognitive Expérimentale

Cours n°2

**La découverte d'une spécialisation cérébrale  
pour les opérations linguistiques**

# Première étape: La découverte de déficits spécifiques du langage

Catani, M. (2014). *Brain Renaissance: From Vesalius to Modern Neuroscience*. Oxford University Press.



Joseph Franz Gall  
(1757-1828)



Jean-Baptiste Bouillaud  
(1796-1881)



Ernest Auburtin  
(1825-1893)



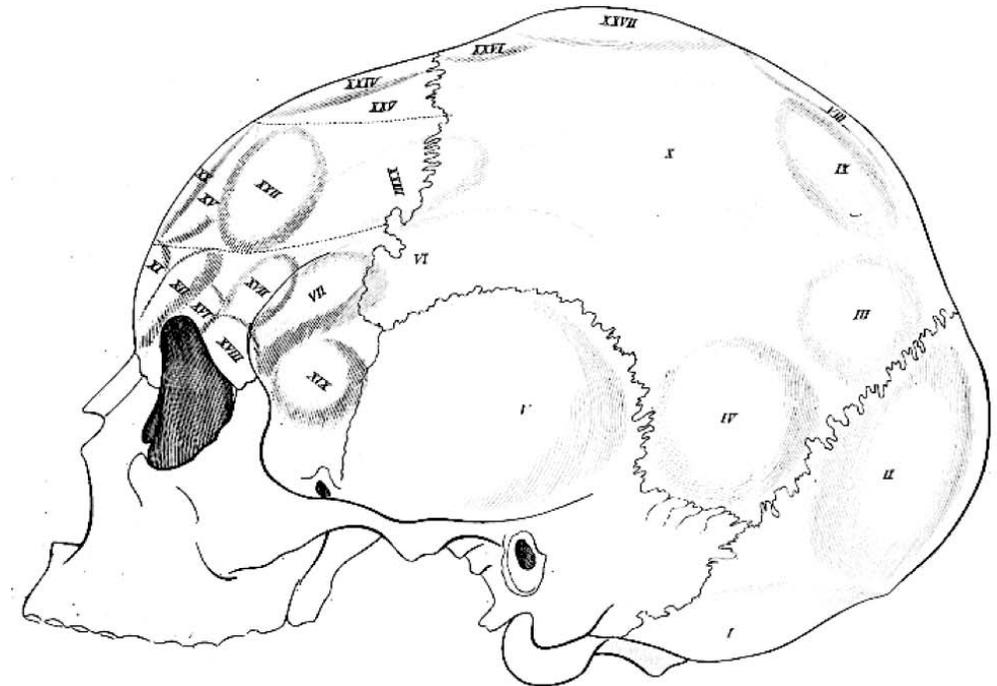
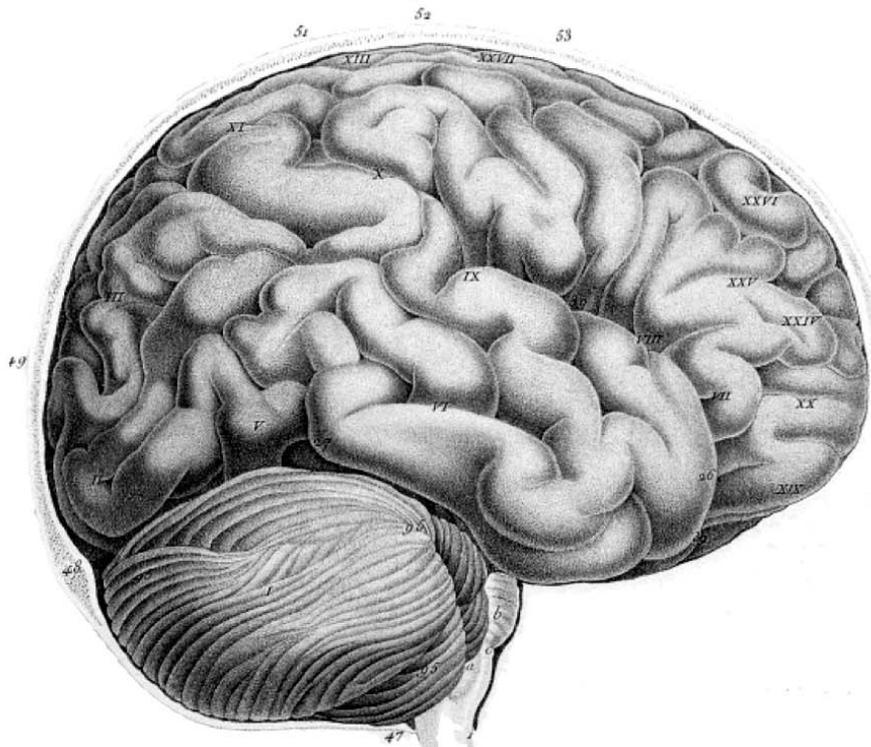
Paul Broca  
(1824-1880)



Carl Wernicke  
(1848-1904)



Joseph Jules Dejerine  
(1849-1917)



# M. Leborgne, le patient princeps de Paul Broca

Broca, P. (1861). Remarques sur le siège de la faculté du langage articulé, suivis d'une observation d'aphémie (perte de la parole). *Bulletin de La Société Anatomique*, 6, 330–357.

La communication de Broca se situe dans le contexte d'un important débat sur l'existence des localisations cérébrales (phrénologie) – en effet, Gall et Spurzheim (1810) postulaient une corrélation entre la faculté de langage et les régions frontales.

Bouillaud et son gendre Auburtin avaient rapporté plusieurs cas d'aphasie (notamment le cas de M. Cullerier, présenté à la Société d'Anthropologie en 1861).

Quelques semaines plus tard, Broca présente un cas de perte de la parole prolongée sur 21 ans, cas particulier car son intelligence est vive, et la lésion est relativement bien identifiée et localisée.

« Il comprenait tout ce qu'on lui disait; il avait même l'oreille très fine; mais, quelle que fût la question qu'on lui adressât, il répondait toujours: tan, tan, en y joignant des gestes très variés au moyen desquels il réussissait à exprimer la plupart de ses idées. (...) Depuis combien d'années il était à Bicêtre? il ouvrit la main quatre fois de suite, et fit l'appoint avec un seul doigt; cela faisait vingt et un ans, et l'on a vu plus haut que ce renseignement était parfaitement exact. »

« Je lui donnerai donc le nom d'**aphémie** ... car ce qui manque à ces malades, c'est seulement la faculté d'articuler les mots. » → perte de la **faculté du langage articulé**. « la faculté du langage (...) persiste évidemment tout entière, puisque les malades comprennent parfaitement le langage articulé et le langage écrit. »

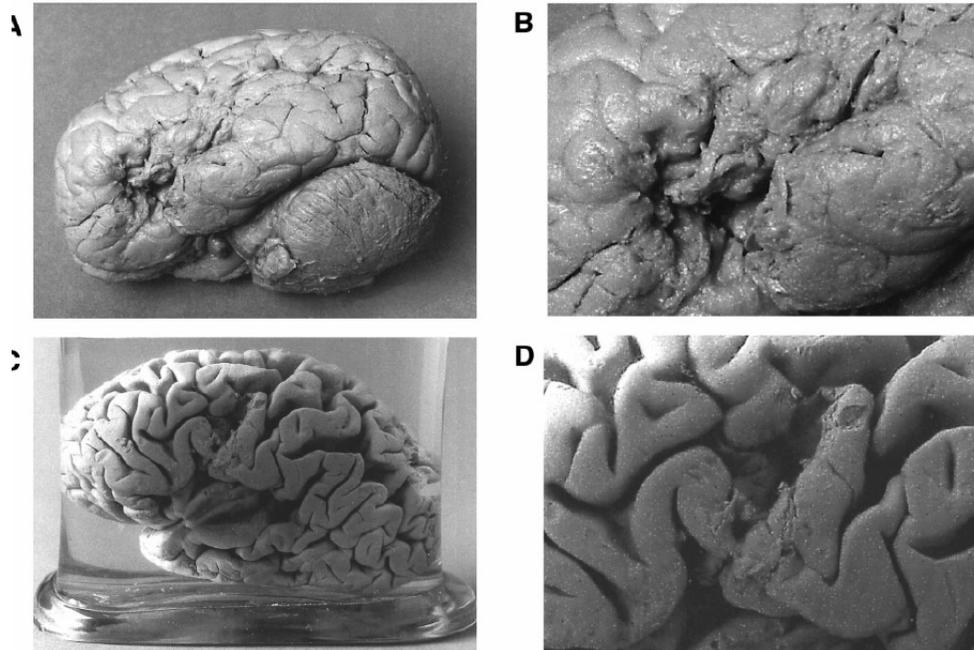
« selon toutes probabilités, c'est dans la troisième circonvolution frontale que le mal a débuté. » ... cependant, « la paroi profonde de la cavité ne présente plus de traces du lobe de l'insula; ce lobe est entièrement détruit ».

« ... au point de vue de l'anatomie pathologique il y a eu deux périodes: l'une dans laquelle une seule circonvolution frontale (probablement la troisième) était altérée; l'autre, dans laquelle le mal s'est propagé de proche en proche à d'autres circonvolutions, au lobe de l'insula ou au noyau extra-ventriculaire du corps strié. »

# Des lésions complexes

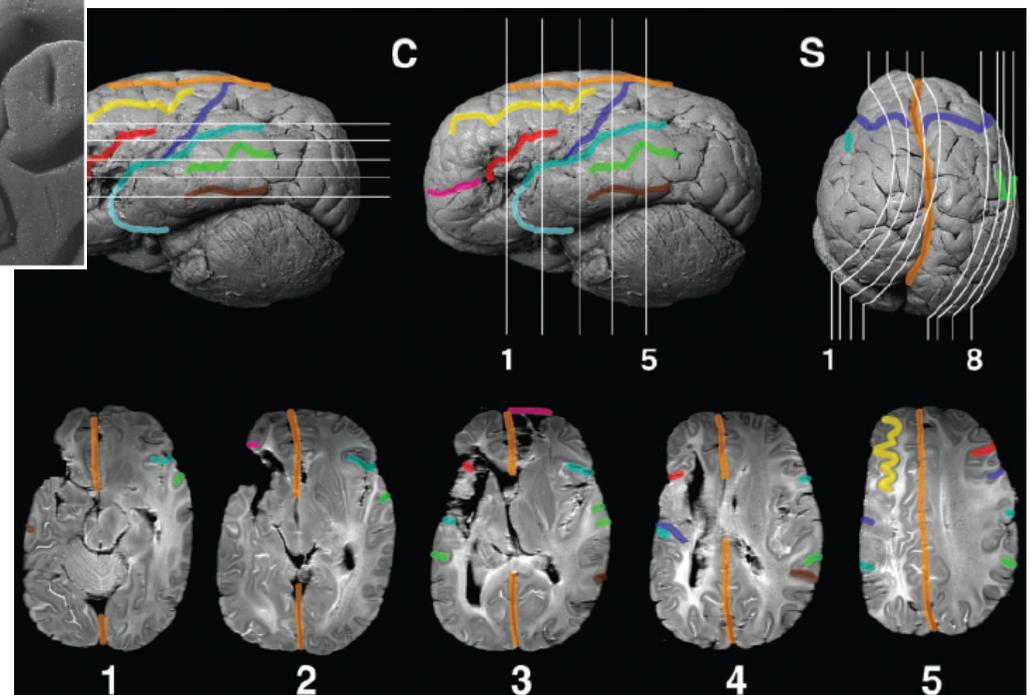
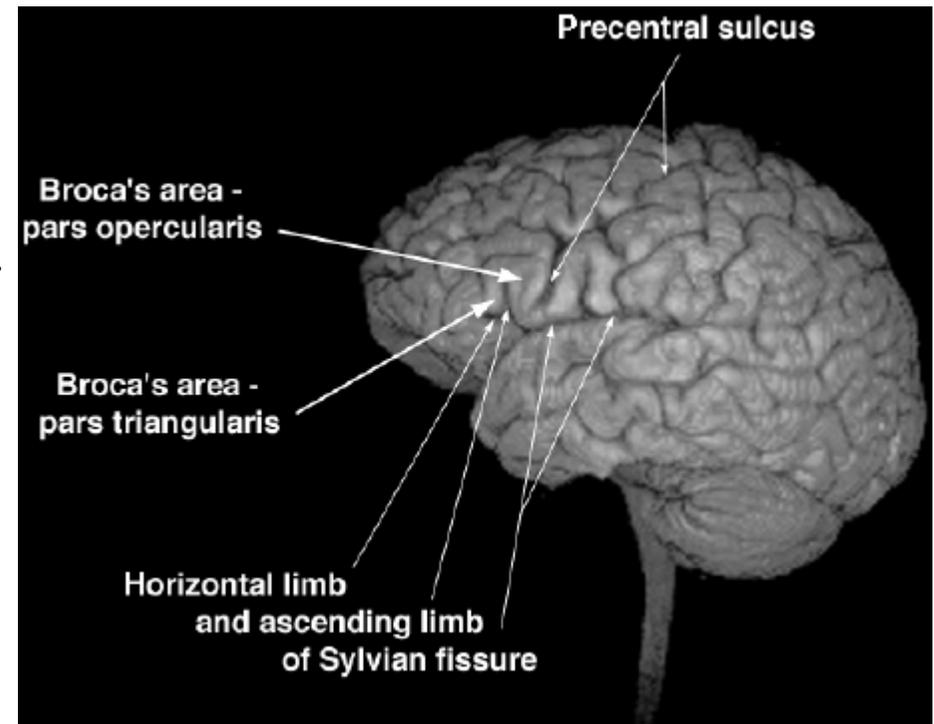
Dronkers, N. F., Plaisant, O., Iba-Zizen, M. T., & Cabanis, E. A. (2007). Paul Broca's historic cases: high resolution MR imaging of the brains of Leborgne and Lelong. *Brain*, 130(5), 1432–1441.

## Cerveau de M. Leborgne (« Tan »)

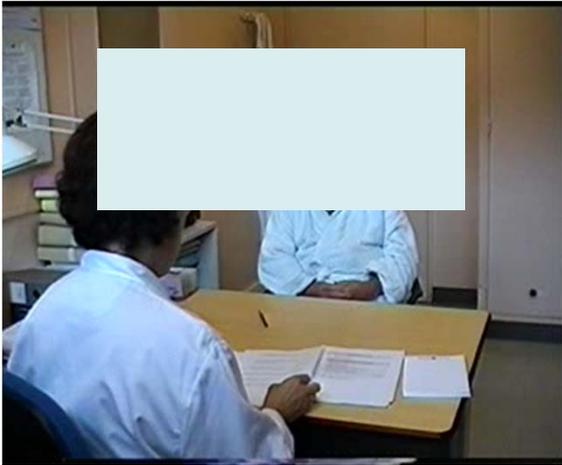


## Cerveau de M. Lelong

Chez Leborgne, la lésion affecte le gyrus frontal inférieur gauche, mais aussi l'insula, le claustrum, le putamen, le globus pallidus et la tête du noyau caudé. Le faisceau longitudinal supérieur et une partie du faisceau arqué sont également atteints, et c'est également le cas chez Lelong.



## Un cas sévère d'aphasie « de Broca »



Déficit d'expression massif,  
souvent avec agrammatisme



Déficit de compréhension



Apraxie bucco-faciale

## Double dissociation avec l'aphasie « de Wernicke » (1874)



Aphasie « fluente » : l'articulation et l'organisation syntaxique de la phrase sont largement préservées.

Présence massive de paraphasies phonémiques (« jargon »).

Déficit de compréhension auditive

Anosognosie.

# Cloche de Charcot et modèle classique des aphasies

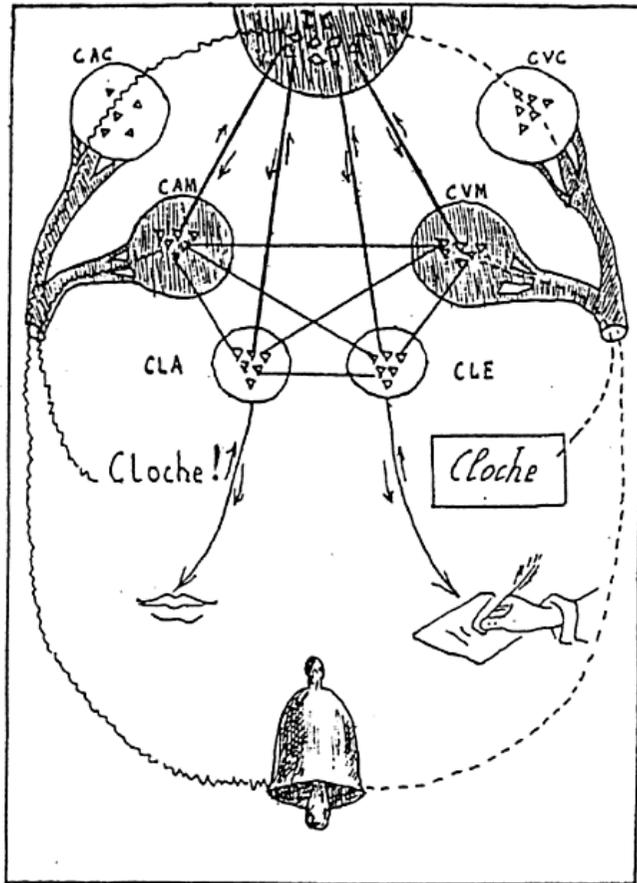
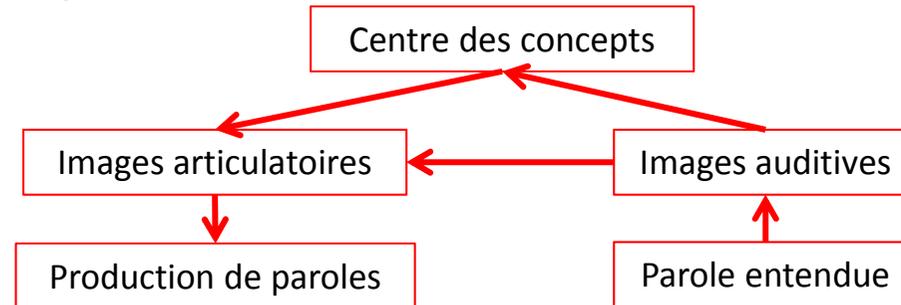


Figure 8. Le diagramme de la cloche de Charcot.

Ce diagramme, dessiné par un élève de Charcot au cours de l'une de ses célèbres leçons, schématise les voies nerveuses d'association en cause dans la compréhension ou la production du mot « cloche ». IC : centre de l'idéation ; CAC : centre auditif commun ; CVC : centre visuel commun ; CAM : centre auditif des mots ; CLA : centre du langage articulé ; CLE : centre du langage écrit. Ce type de diagramme, très populaire à l'époque de Charcot, était utilisé pour rendre compte de fonctions mentales « supérieures » comme le langage, la perception ou le contrôle de l'action.

Wernicke puis Lichtheim proposent des diagrammes simplifiés susceptibles de rendre compte des différents types d'aphasie:



Le diagramme célèbre de la cloche de Charcot (*Leçons sur l'aphasie*, 1883) postule l'existence de 4 régions sensorielles spécialisées:

- Le centre auditif commun
- Le centre auditif des mots
- Le centre visuel commun
- Le centre visuel des mots

plus deux régions motrices spécialisées:

- Le centre du langage articulé
- Le centre du langage écrit

Et enfin un vaste « centre de l'idéation »

D'après Jeannerod, M. (1996). *De la physiologie mentale: Histoire des relations entre biologie et psychologie*. Odile Jacob.

# Aphasie de Broca et syntaxe

Caramazza, A., & Zurif, E. B. (1976). Dissociation of algorithmic and heuristic processes in language comprehension : Evidence from aphasia. *Brain and Language*, 5, 572–583.

L'idée que la région de Broca code les « images articulatoires » des mots, et la région de Wernicke leurs « images auditives » a été longtemps défendue. Selon cette idée, le style télégraphique des patients reflèterait leurs difficultés d'articulation (Lenneberg, 1973).

Les études de Zurif et coll. montrent pourtant que les patients avec aphasie de Broca ou de conduction ont des difficultés considérables à **comprendre** l'organisation des phrases qu'ils entendent, même dans des tâches qui n'exigent aucune production de parole.

- Incapacité de juger quels mots « vont ensemble » pour former des syntagmes. Les patients se contentent de regrouper les mots à contenu sémantiquement relié, sans les rattacher à des mots grammaticaux.
- Difficultés à choisir quelle image représente une phrase:
  - Les patients n'éprouvent pas de difficulté avec les phrases irréversibles, fortement guidées par la sémantique, par ex « La pomme que le garçon mange est rouge »
  - Par contre, ils font de nombreuses erreurs avec les phrases réversibles (« le chat que le chien mord est noir ») ou implausibles (« l'oiseau que le ver mange est jaune »).
  - Même dans ce cas, ils n'éprouvent aucune difficulté lorsque les images incorrectes font appel à un nom, un verbe ou un adjectif incorrect (par exemple un chat blanc et non noir).
  - Ils sont au niveau du hasard lorsqu'on inverse le sujet et l'objet.

“Chez les aphasiques ‘de Broca’, le déficit affecte un mécanisme général de traitement du langage, impliqué dans la syntaxe aussi bien en compréhension qu'en production.”

## RA, un patient agrammatique étudié par Naama Friedmann

(Demande six fois de répéter la question)

Eh bien... eh bien... c'est un peu... euh...

J'ai compris mais... pas vraiment... euh...

(Naama: Qu'est-ce que vous avez compris?)

J'ai compris chat, chien, mord. Mais ce que cette phrase... non...

pas vraiment... euh... j'ai entendu mais pas... non...

Ça c'est ici, et ça c'est là.

Chat – j'ai compris ; Chien – j'ai compris ; Mord – j'ai compris

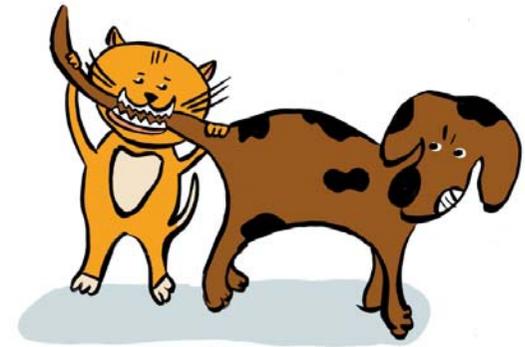
Mais la phrase.... Non.. Et alors j'ai dit « encore ». Encore une fois et c'est tout, d'accord?

(Naama répète la phrase).

Vous pouvez le dire lentement (Naama répète à nouveau la phrase).

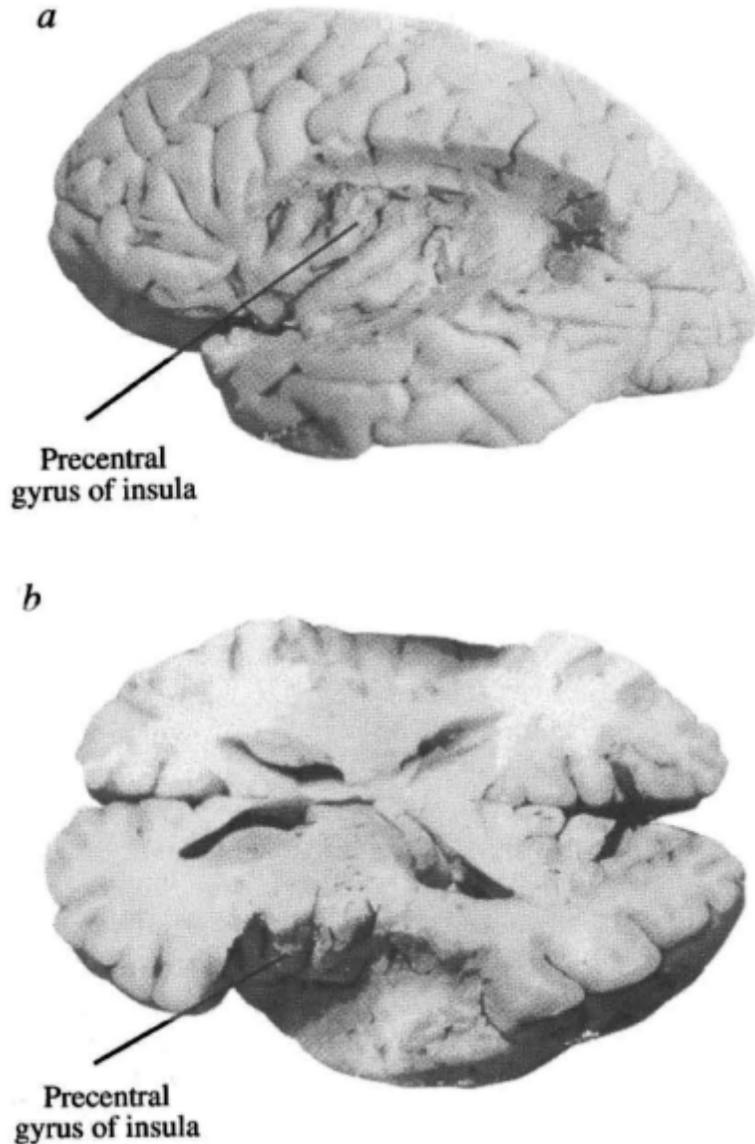
Celle-ci [correct!].

Quel chat le chien mord-il?



# L'apraxie de la parole

Dronkers, N. F. (1996). A new brain region for coordinating speech articulation. *Nature*, 384(6605), 159–61.



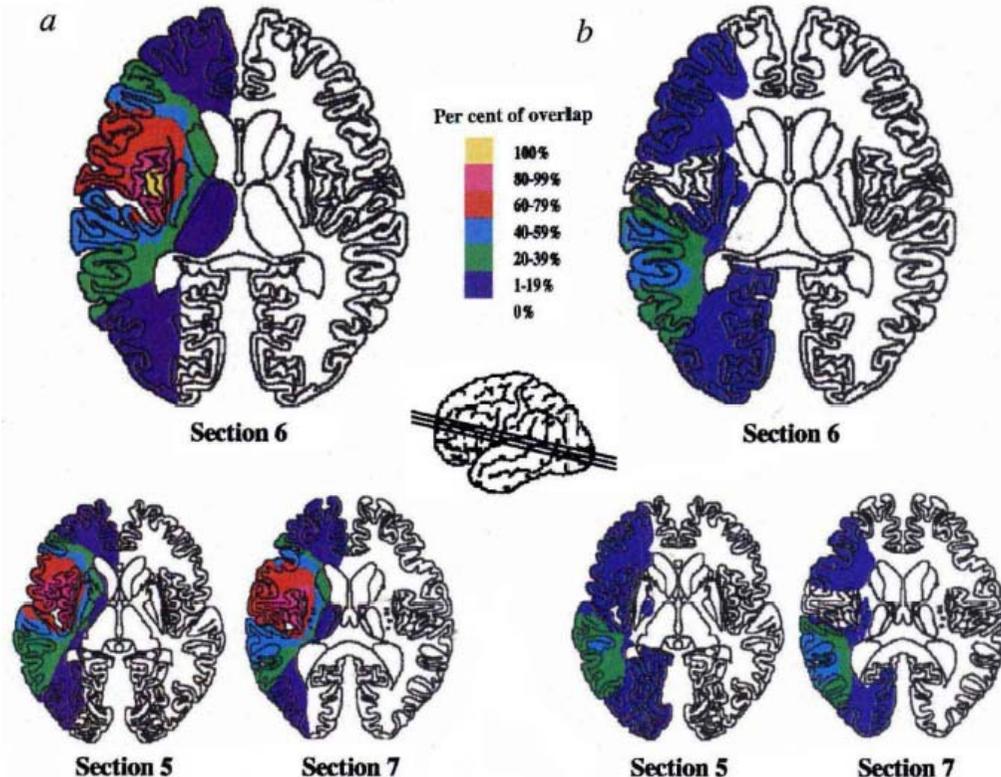
Patient H.F. (essaie de dire le mot 'cushion')

"Oh, uh, uh, /chookurv' uh, uh, uh, /dooW, I know what it's called, it's c-u, uh, no, it's, it's/chooW /chookurv', no."

Patient D.B. (répète cinq fois le mot 'catastrophe')

"catastrophe, /patastrofee/, N catastrophe, /katasrifrobee/ aw sh- -, /ka/ /kata/ sh- -, sh- - I don't know."

Patients avec (G) ou sans (D) apraxie de la parole



# Une approche contemporaine de l'aphasie par imagerie cérébrale

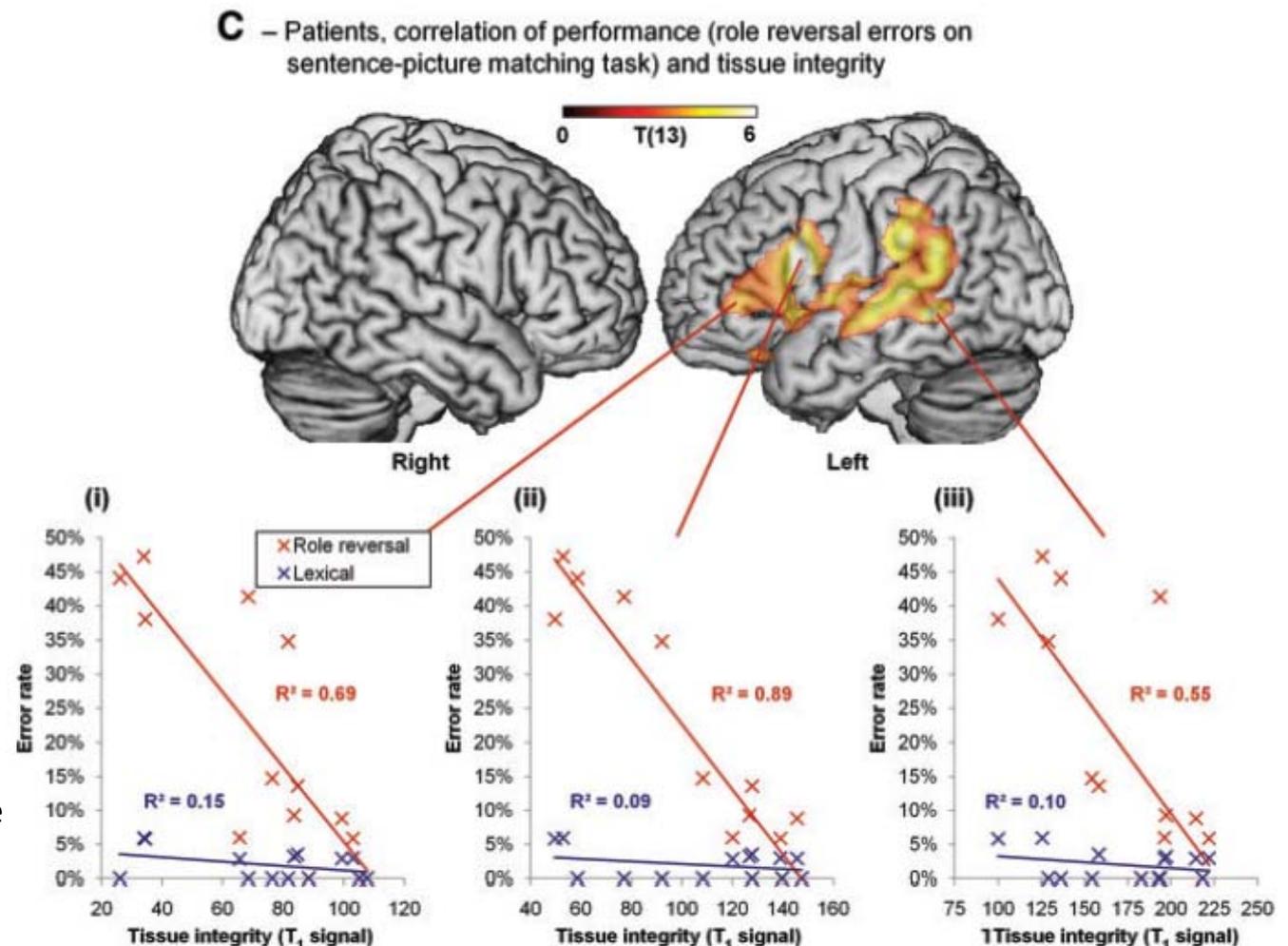
Tyler, L. K., Marslen-Wilson, W. D., Randall, B., Wright, P., Devereux, B. J., Zhuang, J., ... Stamatakis, E. A. (2011). Left inferior frontal cortex and syntax: function, structure and behaviour in patients with left hemisphere damage. *Brain*, 134, 415–31.

Une logique très différente:

- Remplacement des grandes catégories diagnostiques par l'utilisation de tests fins et précis
- Mise en relation de la sévérité des symptômes avec l'étendue des lésions ou des activations cérébrales

Exemple: l'étude de Tyler et al (2011):

- 14 patients droitiers avec lésions gauches (aphasiques ou pas)
- Performances mesurées quantitativement dans un test de comparaison phrase-image avec des phrases passives ou actives.
- La mise en corrélation des performances avec l'intégrité du cortex révèle un réseau frontal inférieur, mais aussi temporal postérieur, associé aux erreurs syntaxiques.
- Ces résultats sont cohérent avec ceux de Caplan et al. (*Brain*, 1996): le réseau syntaxique s'étend au-delà de la région « de Broca » (et même peut-être dans l'hémisphère droit chez certains patients de Caplan et al.).



# L'aphasie « de Broca » serait causée par des lésions simultanées du cortex préfrontal inférieur (*pars opercularis*) et de la région temporale postérieure supérieure

Fridriksson, J., Fillmore, P., Guo, D., & Rorden, C. (2015). Chronic Broca's Aphasia Is Caused by Damage to Broca's and Wernicke's Areas. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 25(12), 4689–4696.

Les patients avec une aphasie « de Broca » chronique (n=20) ont plus de chances que les autres patients aphasiques (n=50) d'avoir des lésions dans la région frontale inférieure, *pars opercularis* (IFGoper)

Cependant, à l'inverse, de nombreux patients ont des lésions massives de cette région sans pour autant souffrir d'aphasie de Broca.

- Une comparaison restreinte aux patients avec une lésion de IFGoper montre que, ce qui distingue les patients avec et sans aphasie de Broca, c'est la présence d'une lésion additionnelle de la région temporale postérieure supérieur de l'hémisphère gauche.
- La taille de la lésion n'est pas un facteur essentiel.

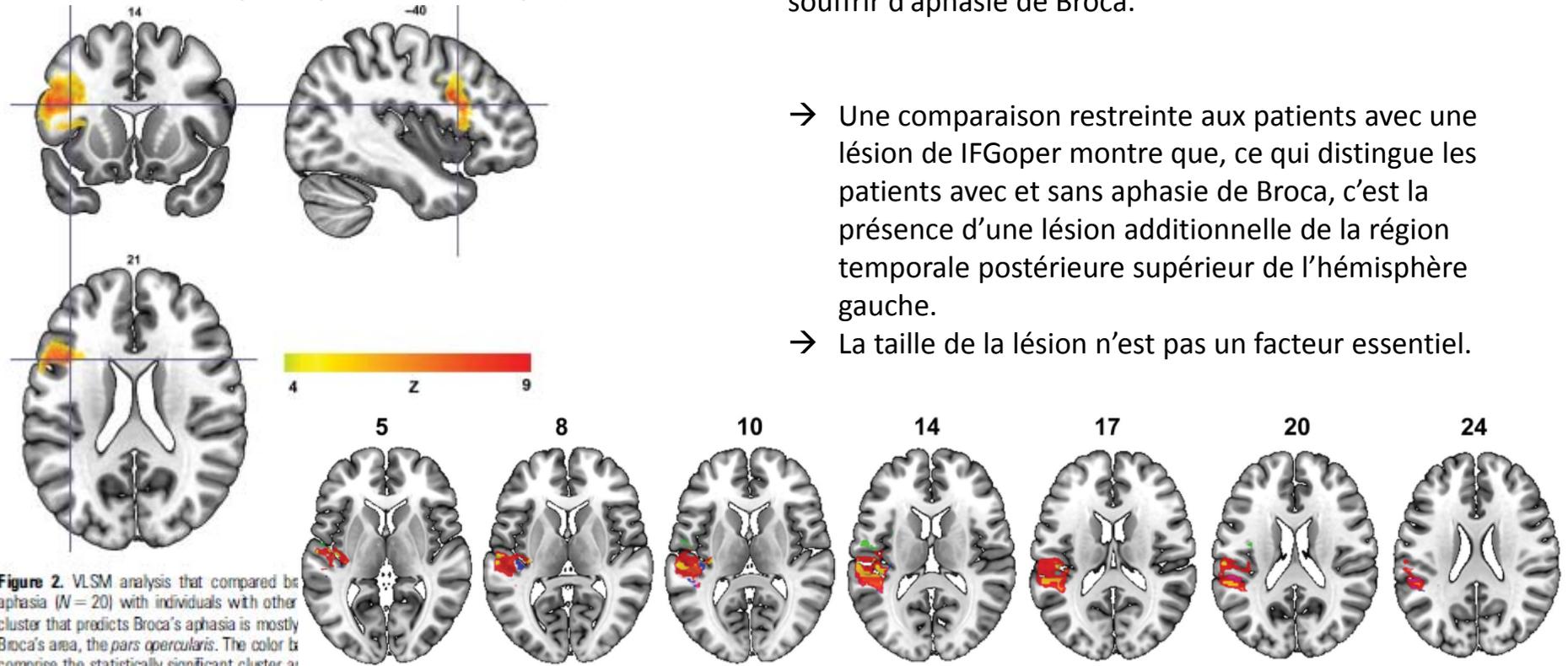


Figure 2. VLSM analysis that compared Broca's aphasia (N = 20) with individuals with other aphasias. The color scale indicates the Z-score, with 4 being the lowest and 9 being the highest. The color scale is labeled 'Z'.

# L'exploration du langage par stimulation cérébrale

Ojemann, G., & Mateer, C. (1979). Human language cortex: localization of memory, syntax, and sequential motor-phoneme identification systems. *Science*, 205(4413), 1401–1403.

La stimulation de certaines régions entraîne différents types d'erreurs: impossibilité de dénommer des images (o), erreurs de lecture (A), jargon (J), et erreurs grammaticales (G).

Exemple, dans une tâche de complétion de phrases:

Stimulus: "If my son is late for class again he . . . principal"

Réponse: "If my son will getting late today he'll see the principal,"

Les erreurs de ce type sont évoquées par la stimulation de sites situés dans la région frontale inférieure gauche (« Broca ») ou bien dans ou à proximité de la région temporale supérieure postérieure gauche.

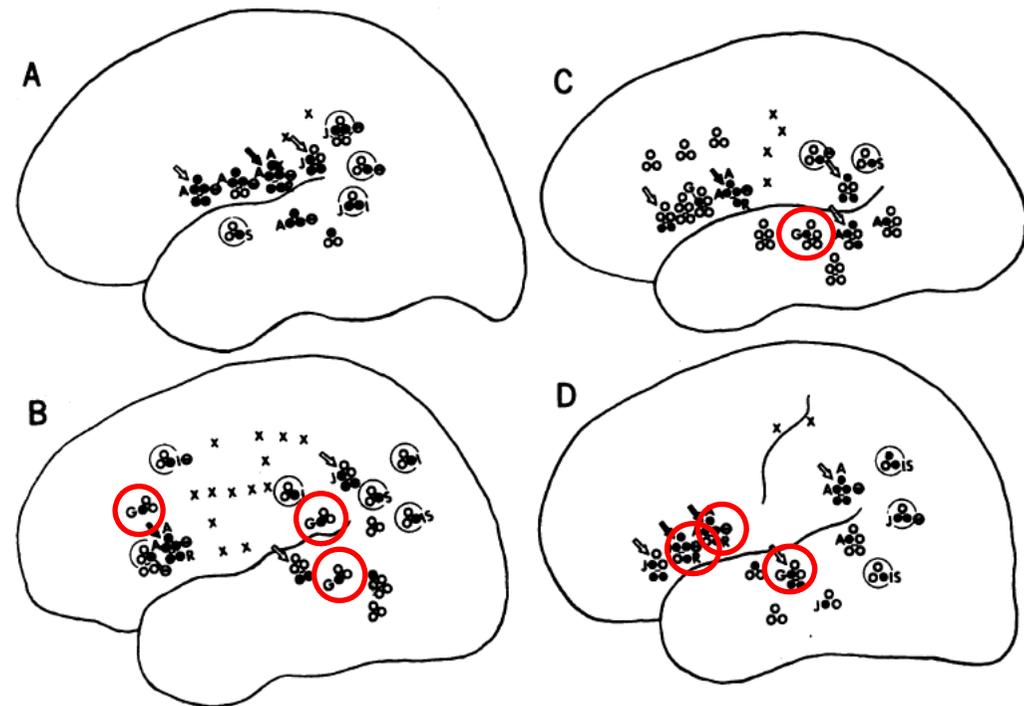
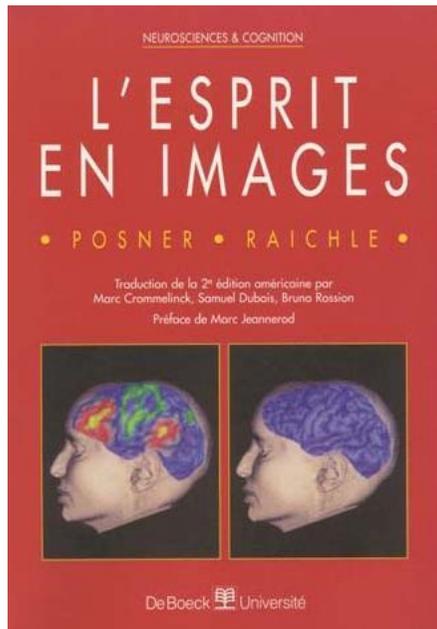


Fig. 1. Sites where stimulation alters language functions in dominant hemispheres of four patients. Naming, reading, and short-term memory measured at each site identified by a triangle of circles: naming performance, top; reading, lower left; short-term memory, lower right. Filled circles indicate statistically significant ( $P < .05$ ) errors in that function during stimulation. Sites with two additional circles below a line also had tests of phoneme identification (left) and orofacial movements (right). The letter beside the filled circle identifies the type of error. Naming errors: A, arrests of speech; no letter, inability to name but demonstrated ability to speak (anomia). Reading errors: A, arrests, failure to read, or production of only a few words of the sentence; J, jargon, reading fluent, but with frequent errors in individual words including nouns; G, grammatical errors, production of incorrect, or deletion of syntactic elements. These last two types of reading errors were not seen on control trials. Short-term verbal memory errors: I, S, errors following stimulation during input or storage;  $\theta$ , errors at the time of retrieval. Orofacial movement errors: R, errors in repetition of the same movement; no letter, errors only on sequencing different movements. Phoneme identification errors were not further classified. Arrows and large circles are sites included in the major subdivisions of the language cortex. Filled arrow, final motor pathway for speech. Open arrow, sequential motor-phoneme identification (SM-PI) system. Large circle, memory system. X, sites of evoked motor or sensory responses identifying rolandic cortex. (A) Male, verbal intelligence quotient (VIQ) = 98, stimulation at 5 mA between peaks of biphasic pulses. (B) Female, VIQ = 90, 7 mA. (C) Female, VIQ = 98, 3 mA. (D) Male, VIQ = 93, 8 mA.



## L'imagerie cérébrale en caméra à positons

Posner, M. I., & Raichle, M. E. (1994). *Images of mind*. New York: Scientific American Library.

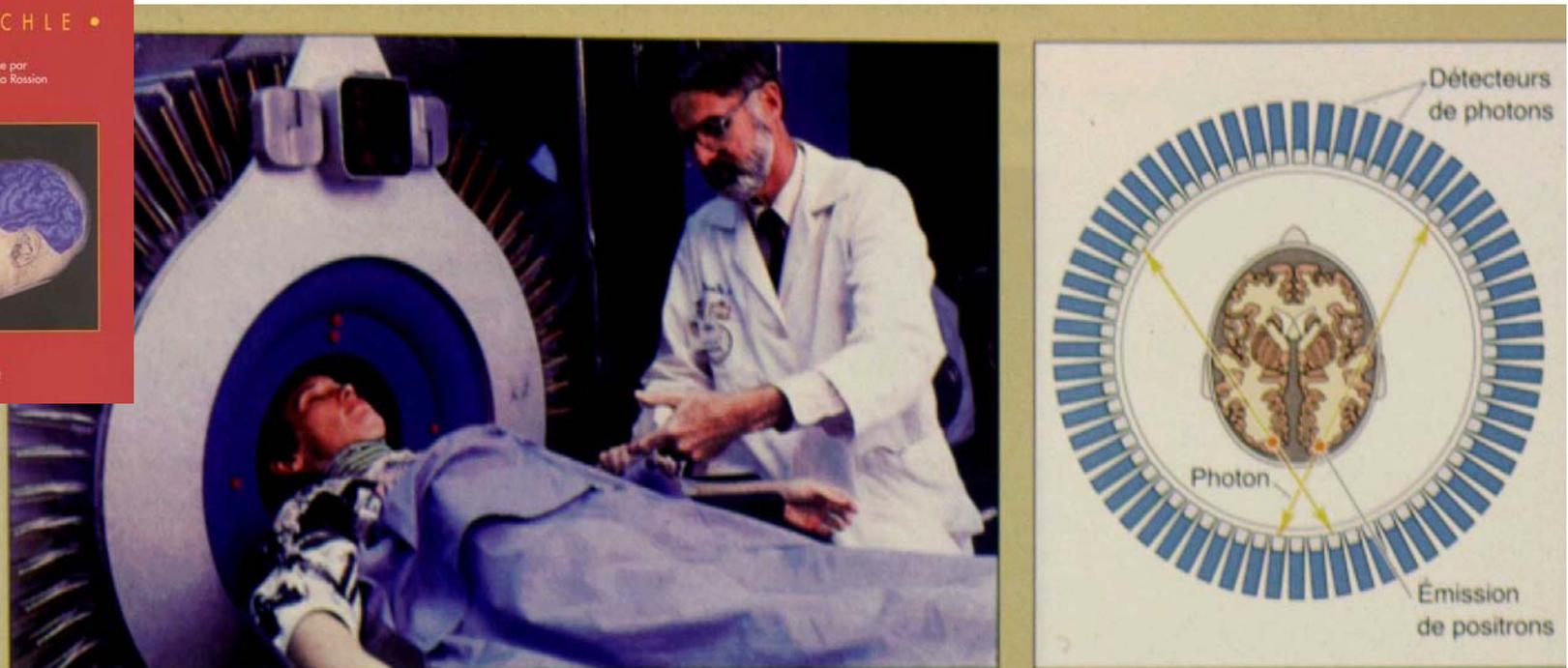


Figure A

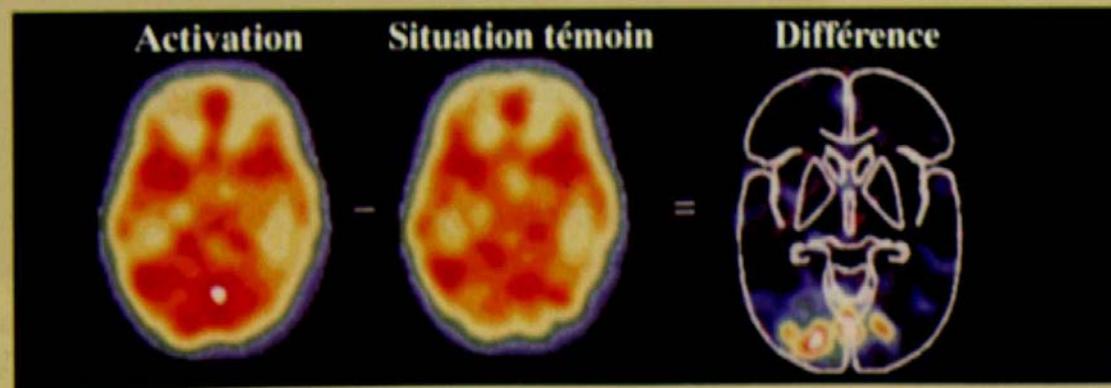


Figure B

# Une première étude de la représentation cérébrale des phrases en tomographie par émission de positons

Mazoyer, B. M., Dehaene, S., Tzourio, N., Frak, V., Syrota, A., Murayama, N., et al. (1993). The cortical representation of speech. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 5, 467-479.

Tentative d'isoler différents niveaux de traitement du langage: traitements acoustique, phonologique, lexical, prosodique, syntaxique et conceptuel.

Présentation d'une hiérarchie de stimuli:

- Phrases dans une langue inconnue (tamoul)
- Liste de mots français
- Phrases normales
- Phrases sémantiquement anormales: les mots à contenus sont remplacés par d'autres mots.
- Phrases en « Jabberwocky »: les mots à contenu sont remplacés par des pseudo-mots

**Table 1.** Experimental Design<sup>a</sup>

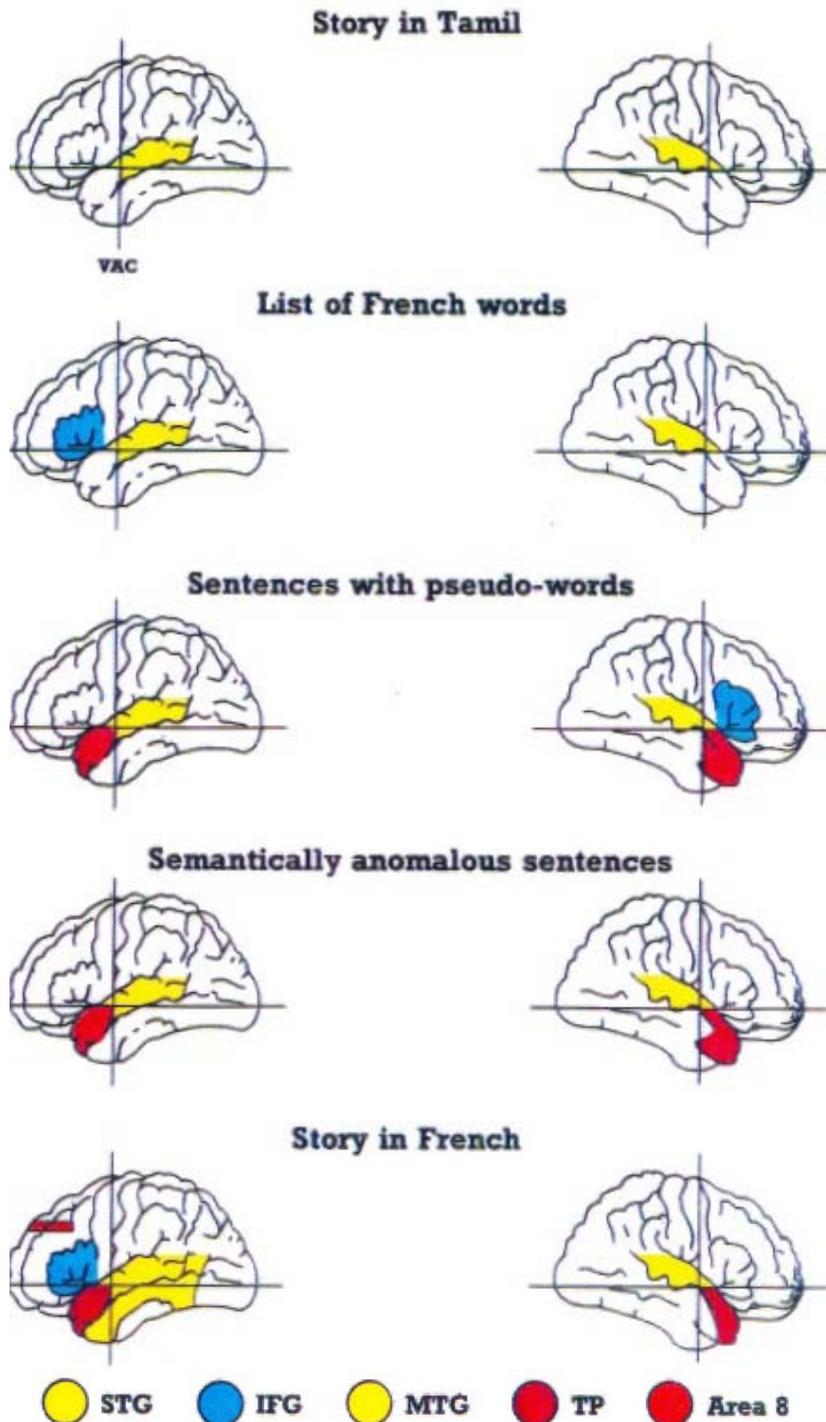
	<i>Story in Tamil</i>	<i>List of French Words</i>	<i>Distorted Stories</i>		<i>Story in French</i>
			<i>Sentences with Pseudowords</i>	<i>Semantically Anomalous Sentences</i>	
Putative processing systems					
Acoustical	✓	✓	✓	✓	✓
Phonological	—	✓	✓	✓	✓
Lexical	—	✓	—	✓	✓
Prosodic	—	—	✓	✓	✓
Syntactic	—	—	✓	✓	✓
Conceptual	—	—	—	—	✓

# Une première étude en tomographie par émission de positons

Mazoyer, B. M., Dehaene, S., Tzourio, N., Frak, V., Syrota, A., Murayama, N., et al. (1993). The cortical representation of speech. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 5, 467-479.

## Résultats:

- Lors de l'écoute d'une langue étrangère inconnue, le traitement acoustico-phonologique est confiné aux régions temporales supérieures bilatérales.
- A l'opposé, l'écoute de la langue maternelle active un vaste réseau, latéralisé à gauche, qui comprend notamment la région « de Broca ».
- Mise en évidence d'une région jusqu'alors sous-estimée: le pôle temporal (bilatéral, avec une latéralisation à l'hémisphère gauche)
  - Syntaxe? Compréhension des structures complexes? prosodie?
- La distinction entre syntaxe, sémantique, et prosodie reste difficile.

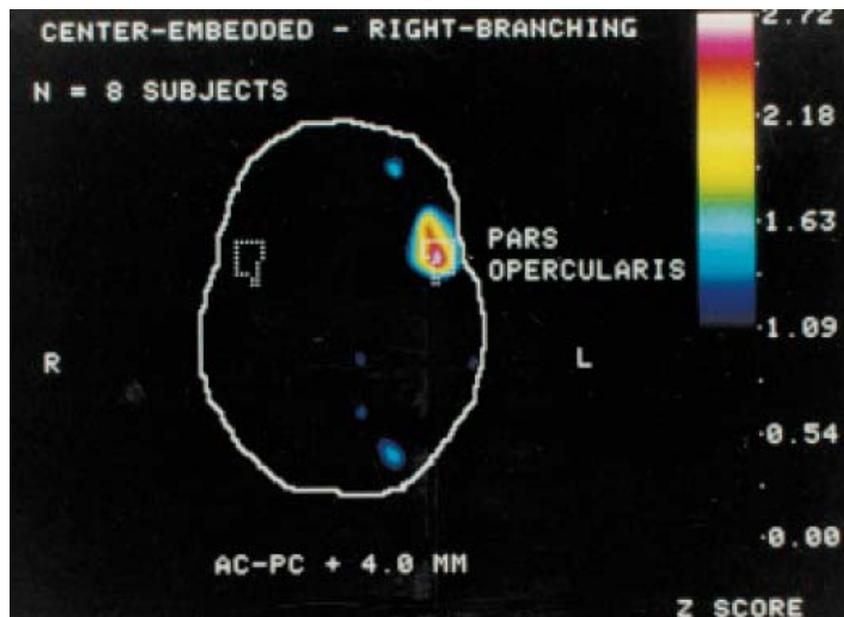


# Effet de la complexité syntaxique

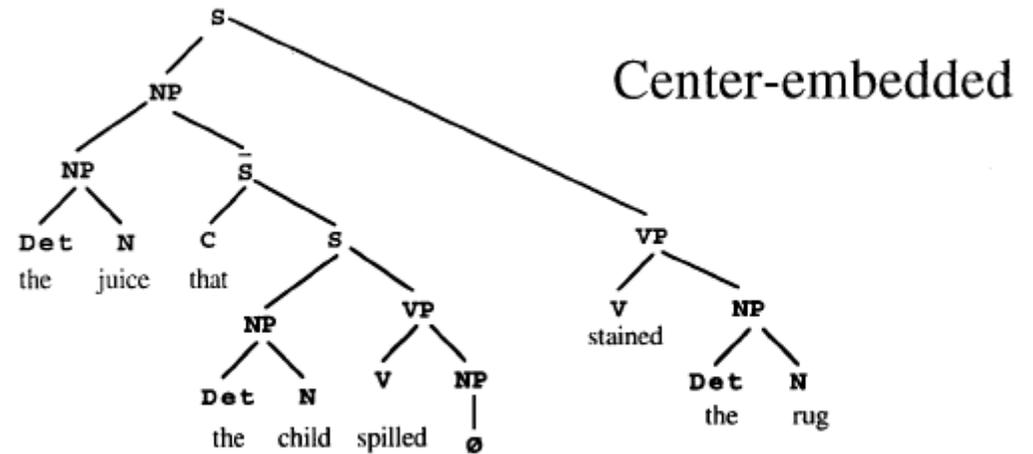
Stromswold, K., Caplan, D., Alpert, N., & Rauch, S. (1996). Localization of syntactic comprehension by positron emission tomography. *Brain Lang*, 52(3), 452–73.

Deux blocs avec écoute de phrases de complexité syntaxique variable.  
Tâche de jugement de plausibilité.

→ Activation restreinte à la région operculaire du gyrus frontal inférieur gauche.

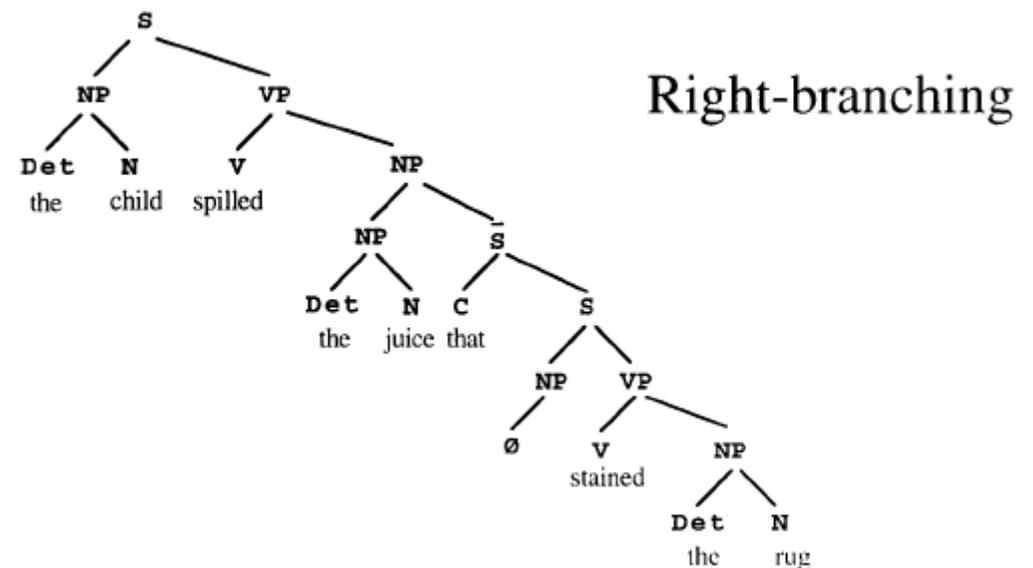


## Condition 1



Center-embedded construction: The juice that the child spilled \_\_ stained the rug

## Condition 2



Right branching construction: The child spilled the juice that \_\_ stained the rug

# Effet de la complexité syntaxique

Just, M. A., Carpenter, P. A., Keller, T. A., Eddy, W. F., & Thulborn, K. R. (1996). Brain activation modulated by sentence comprehension. *Science*, 274(5284), 114–6.

Trois niveaux de complexité:

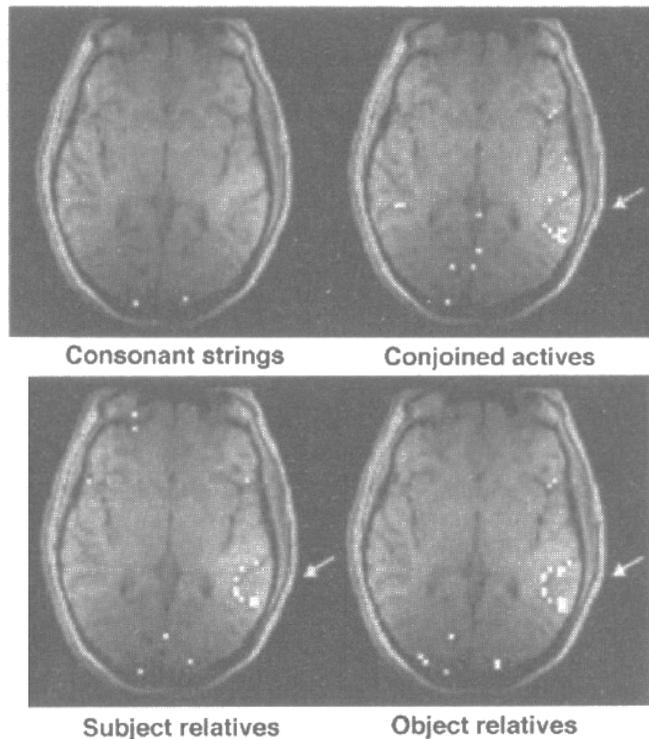
1) Deux phrases conjointes, sans enchâssement : "The reporter attacked the senator and admitted the error."

2) Relative sujet: "The reporter that attacked the senator admitted the error."

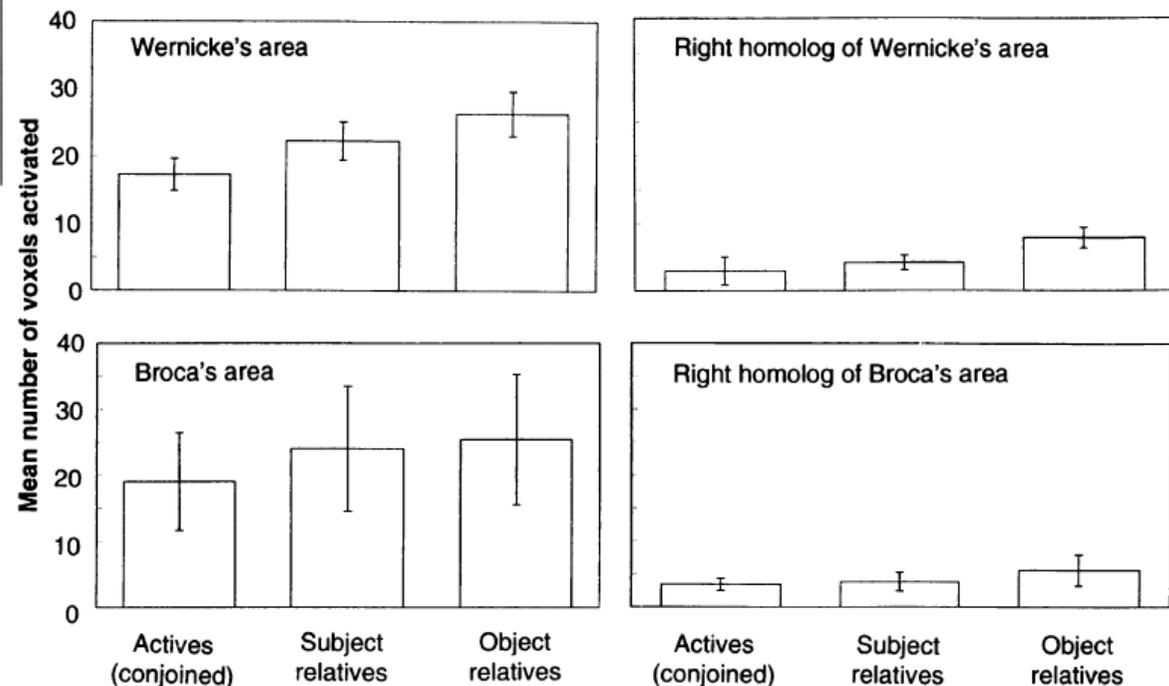
3) Relative objet: "The reporter that the senator attacked admitted the error."

Contrôle = vision passive de chaînes de consonnes: "Pws ntkgrfin zjkjrng kwtdc sbfght swm mjrdbxq kgt mxbtq"

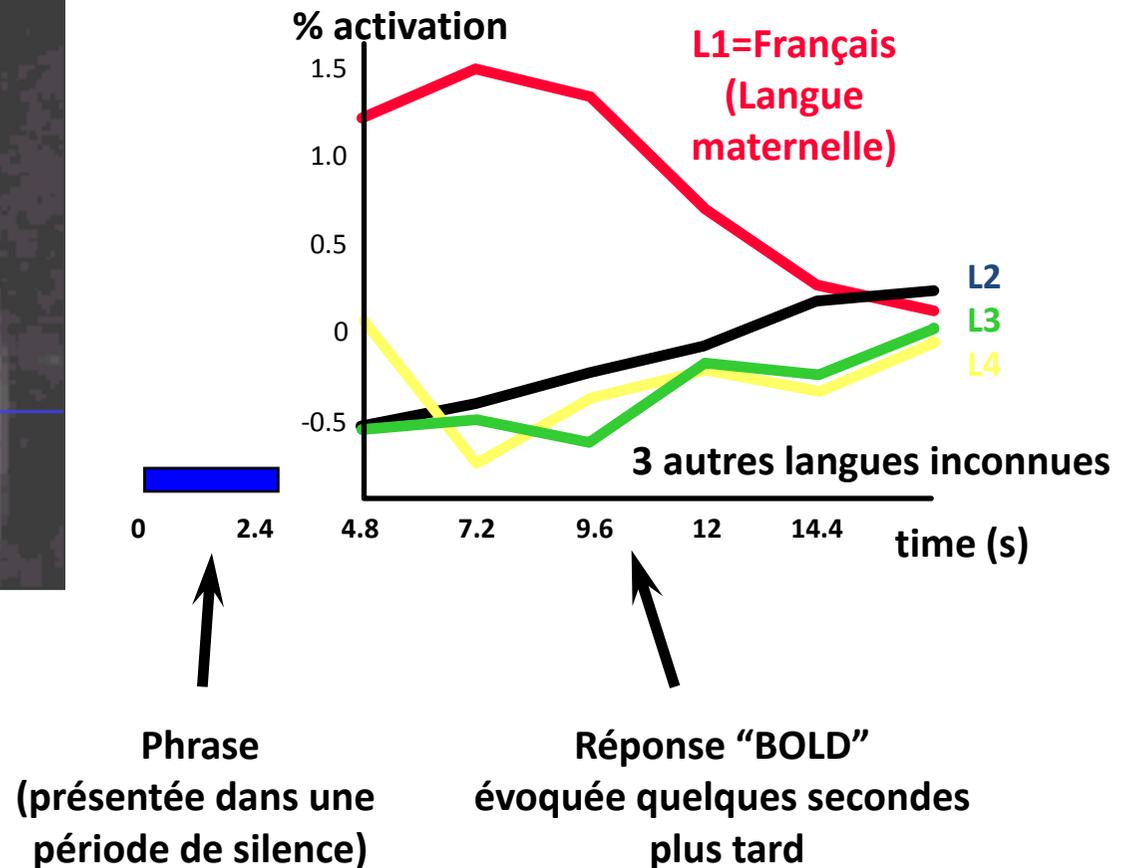
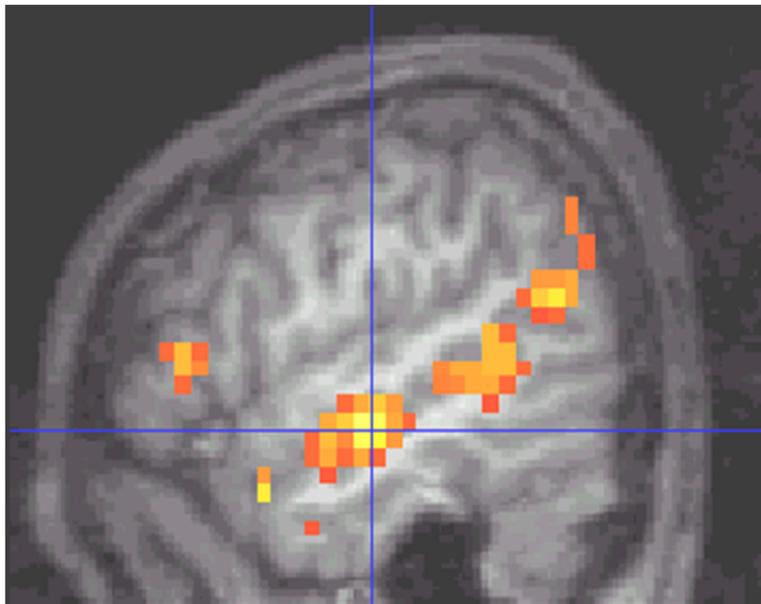
Jugement de véracité d'une autre phrase: "The reporter attacked the senator, true or false?"



Résultat: la complexité syntaxique se traduit par un accroissement d'activité dans le cortex temporel postérieur et la région frontale inférieure (particulièrement à gauche).



# L'IRM fonctionnelle permet aujourd'hui d'identifier l'ensemble des aires du langage en quelques minutes

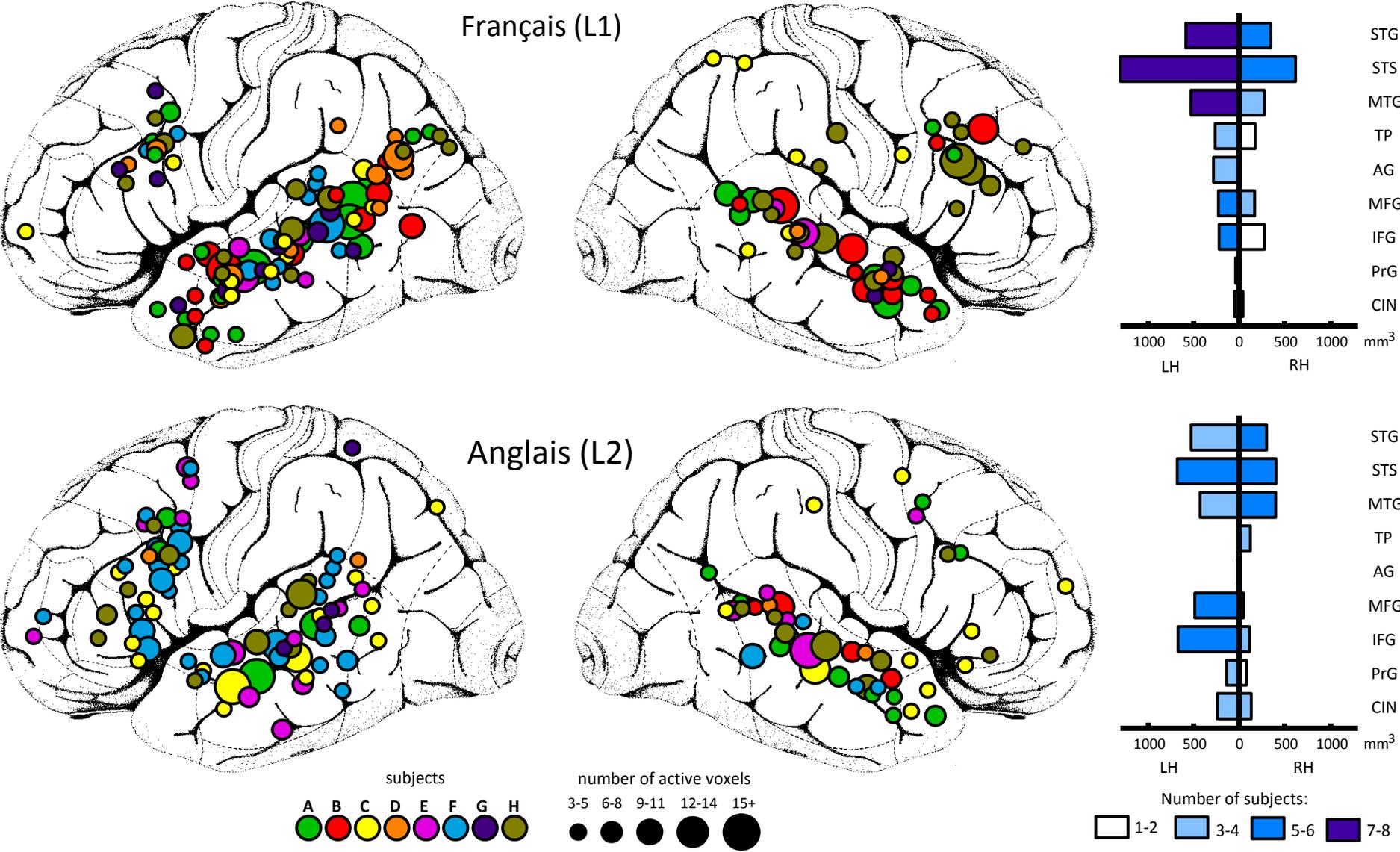


Pallier, C., Dehaene, S., Poline, J. B., LeBihan, D., Argenti, A. M., Dupoux, E., et al. (2003). Brain imaging of language plasticity in adopted adults: can a second language replace the first? *Cereb Cortex*, 13(2), 155-161.

# Reproductibilité des activations dans l'hémisphère gauche pour L1

## Variabilité inter-individuelle de la représentation de L2

Dehaene, S., Dupoux, E., Mehler, J., Cohen, L., Paulesu, E., Perani, D., et al. (1997).  
 Anatomical variability in the cortical representation of first and second languages. *NeuroReport*, 8, 3809-3815.



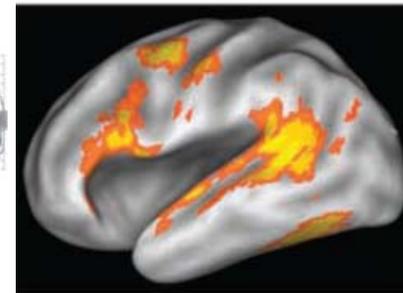
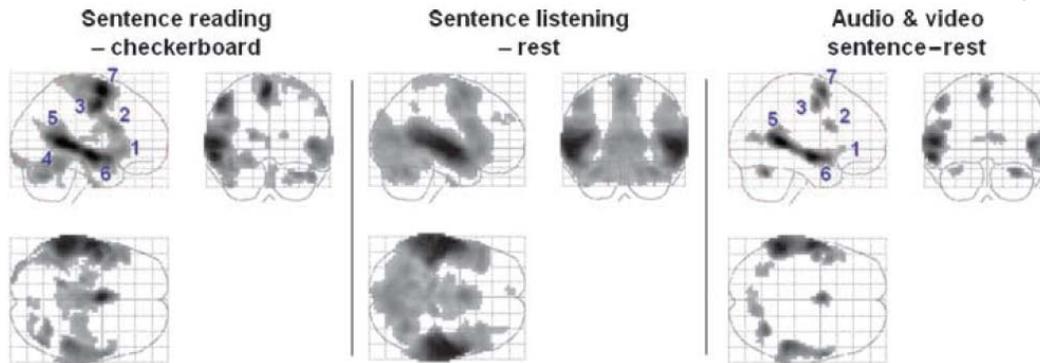
# Variabilité individuelle dans la latéralisation des réseaux du langage

Pinel, P., & Dehaene, S. (2009). Beyond hemispheric dominance: brain regions underlying the joint lateralization of language and arithmetic to the left hemisphere. *J Cogn Neurosci*, 22(1), 48–66.

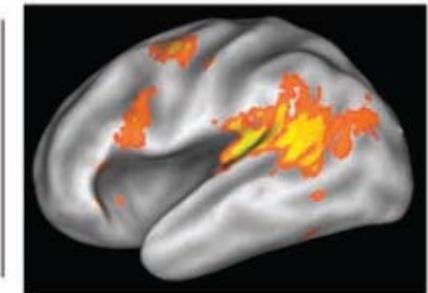
Etude de 209 sujets droitiers à l'aide d'une séquence « *localizer* » de 5 minutes.

Activation par des phrases écrites ou parlées

Pratiquement toutes les régions sont latéralisées à gauche



Lecture de phrases



Ecoute de phrases

Cependant, le degré de latéralisation varie d'un sujet à l'autre – tout en étant reproductible pour le langage écrit et parlé

## LI Correlation across the Two Language Tasks

		Reading						
		Inferior Frontal	Precentral	Mid-frontal	Fusiform	Posterior STS	Anterior STS	Cingulate
Speech listening	Inferior Frontal	<math><10^{-3}</math>	.019	.472	.041	.092	.372	.380
	Precentral	.027	<math><10^{-3}</math>	.132	.622	.307	.101	.012
	Mid-frontal	.082	.429	<math><10^{-3}</math>	.352	.563	.177	.903
	Fusiform	.381	.585	.178	.023	.050	.695	.666
	Posterior STS	.005	.246	.289	.031	<math><10^{-3}</math>	.025	.080
	Anterior STS	.016	.103	.503	.710	.410	<math><10^{-3}</math>	.737
	Cingulate	.120	.637	.031	.796	.476	.664	<math><10^{-3}</math>

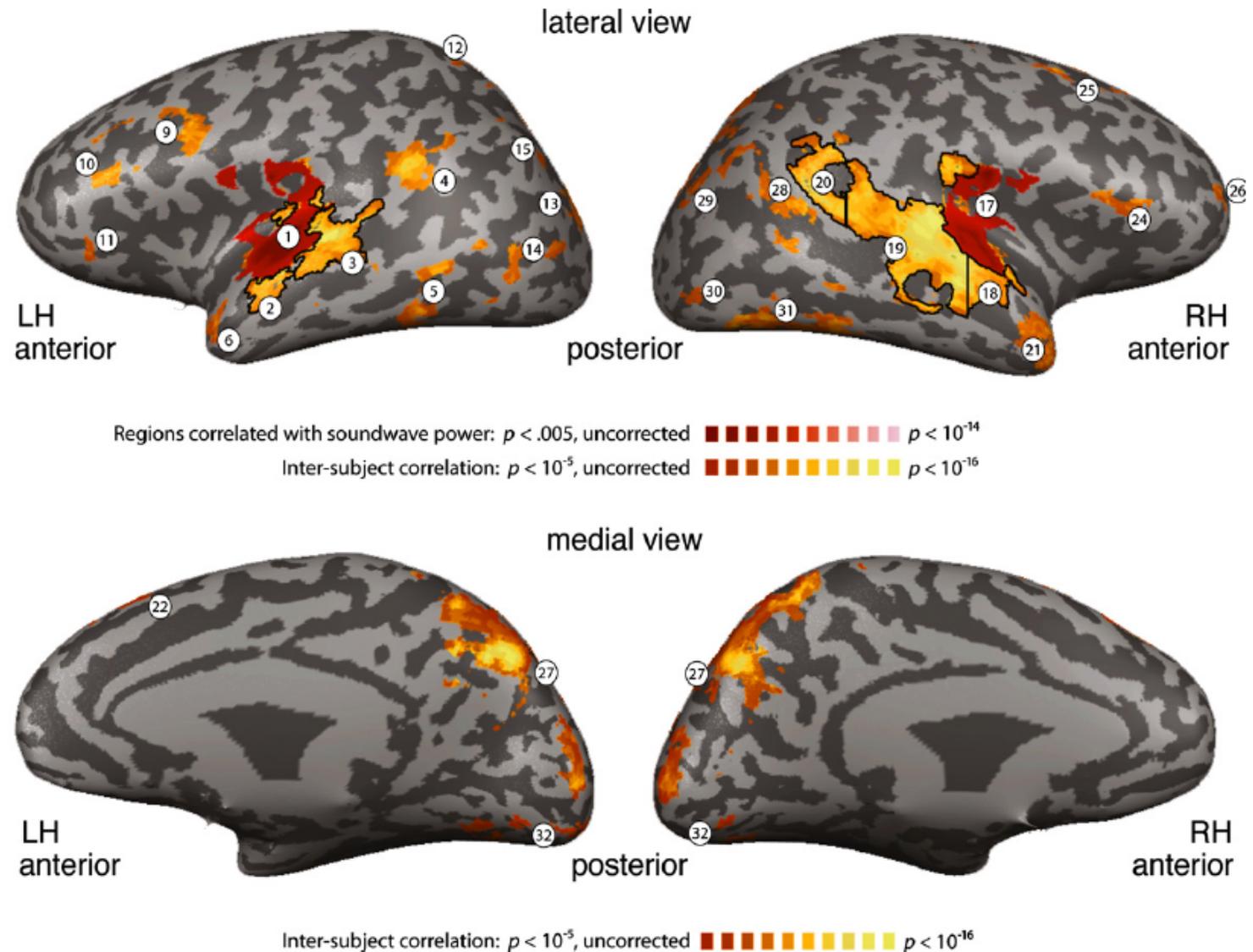
# Corrélations inter-individuelles lors de l'écoute d'une histoire

Brennan, J., Nir, Y., Hasson, U., Malach, R., Heeger, D. J., & Pylkkänen, L. (2012). Syntactic structure building in the anterior temporal lobe during natural story listening. *Brain and Language*, 120(2), 163–173.

Ecoute d'une histoire identique (Alice au pays des merveilles).

Corrélation, en chaque point, des activations observées en un point donné du cortex chez deux sujets différents à travers le temps.

→ Mobilisation de la région temporale, frontale inférieure, et du précuneus (dans les deux hémisphères) pratiquement identique chez tous les sujets.



# Corrélations entre lecture et écoute des mêmes histoire

Regev, M., Honey, C. J., Simony, E., & Hasson, U. (2013). Selective and invariant neural responses to spoken and written narratives. *J. Neuroscience*, 33(40), 15978–15988.

Écoute d'une histoire ou lecture mot par mot de la même histoire, avec le même déroulement temporel.

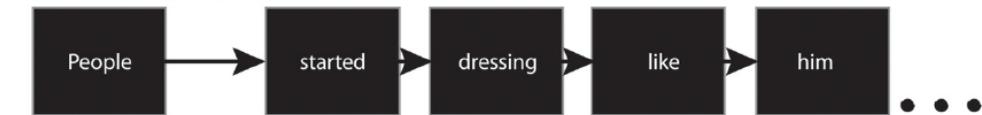
Corrélation des activations évoquées par le langage parlé chez le sujet A avec celles évoquées par la lecture chez le sujet B.

→ Un réseau d'aires cérébrales pratiquement identique est mobilisé par les deux tâches.

## Spoken narrative

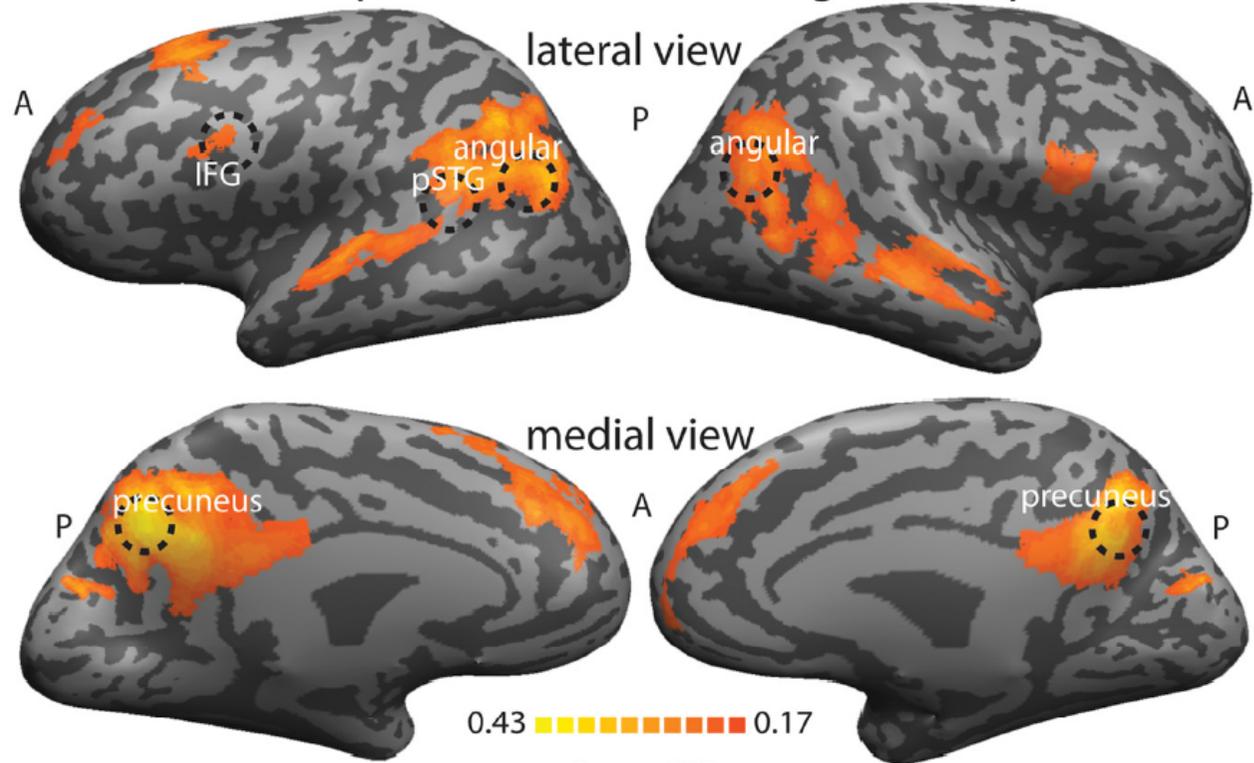


## Written narrative



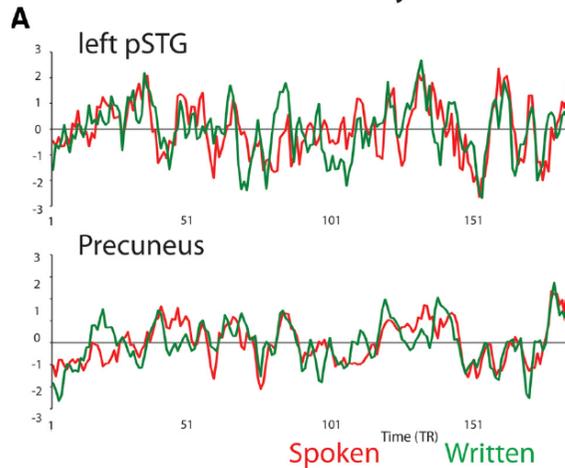
## Left Hemispheres

## Right Hemispheres



$P_{(FWE)} < 0.05$

## Modality invariance



# Les aires du langage sont éminemment reproductibles... à une exception près : elles s'étendent au cortex visuel chez les aveugles

Lane, C., Kanjlia, S., Omaki, A., & Bedny, M. (2015). "Visual" Cortex of Congenitally Blind Adults Responds to Syntactic Movement. *J Neuroscience*, 35(37), 12859–12868.

Amir Amedi avait montré que les aires visuelles s'activent chez les aveugles de naissance, dans des tâches de mémoire verbale ou de génération de verbes.

Dans l'article de Lane et coll., les sujets écoutent des phrases simples ou complexes et doivent répondre à des questions.

La tâche de contrôle consiste à écouter une liste de pseudomots, puis à décider si un item particulier en fait partie.

- Activation massive du cortex visuel
- Effet de complexité syntaxique

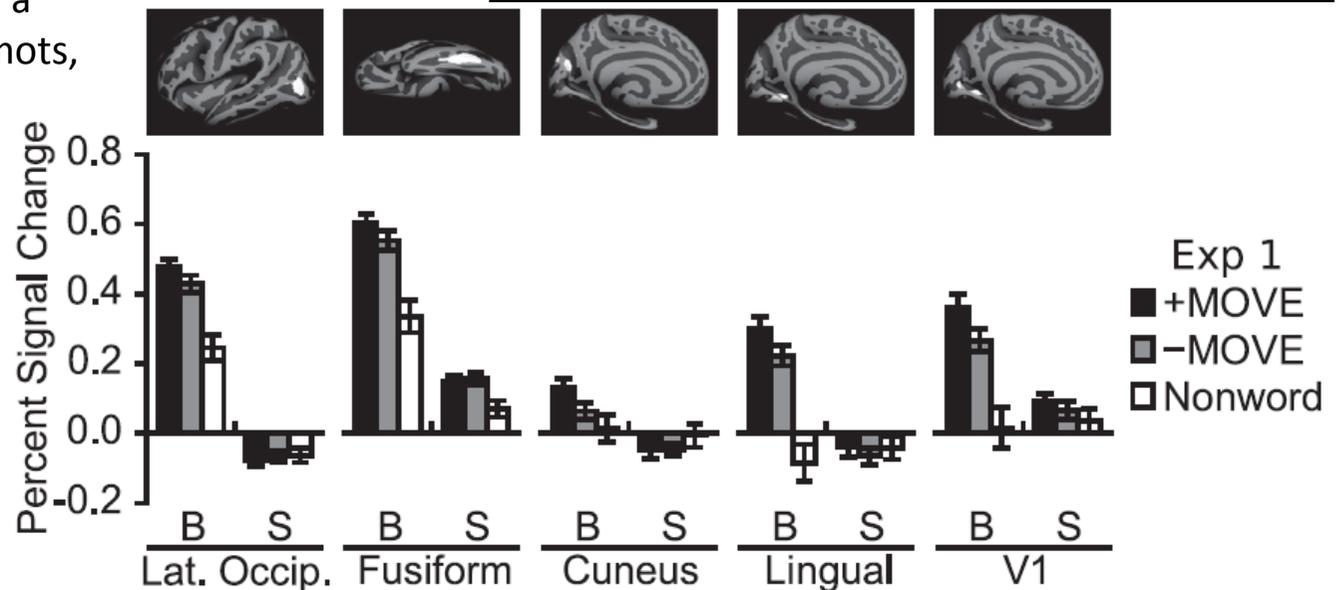
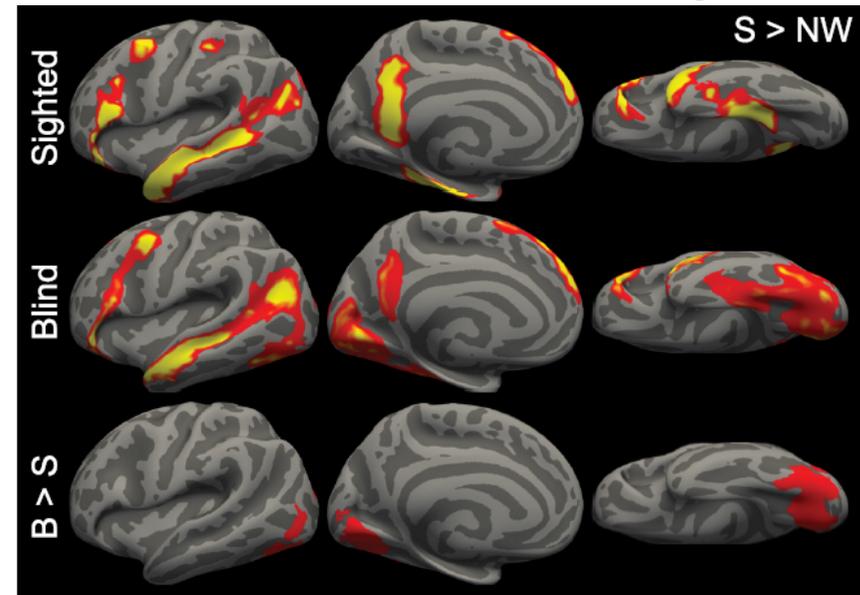


Figure 4. Responses to syntactic movement in occipital group ROIs in blind (B) and sighted (S) participants. For each subject,

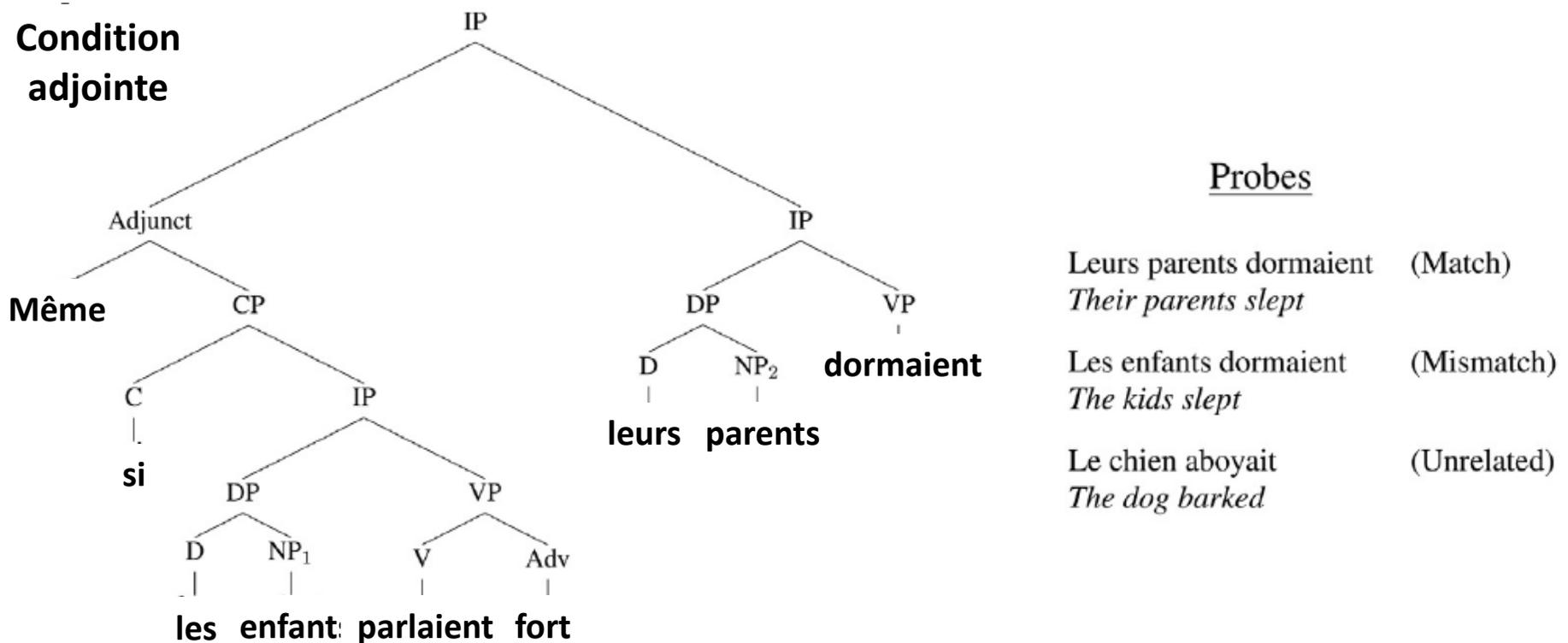
# Un réseau cérébral pour la manipulation des arbres syntaxiques

Pattamadilok, Dehaene & Pallier, Cortex, 2016

Parmi le vaste jeu de régions cérébrales activées par le langage parlé, peut-on identifier un sous-ensemble qui soit spécialisé dans la manipulation des arbres syntaxiques?

« Le camion qui double la voiture est rouge » → Qu'est-ce qui est rouge?

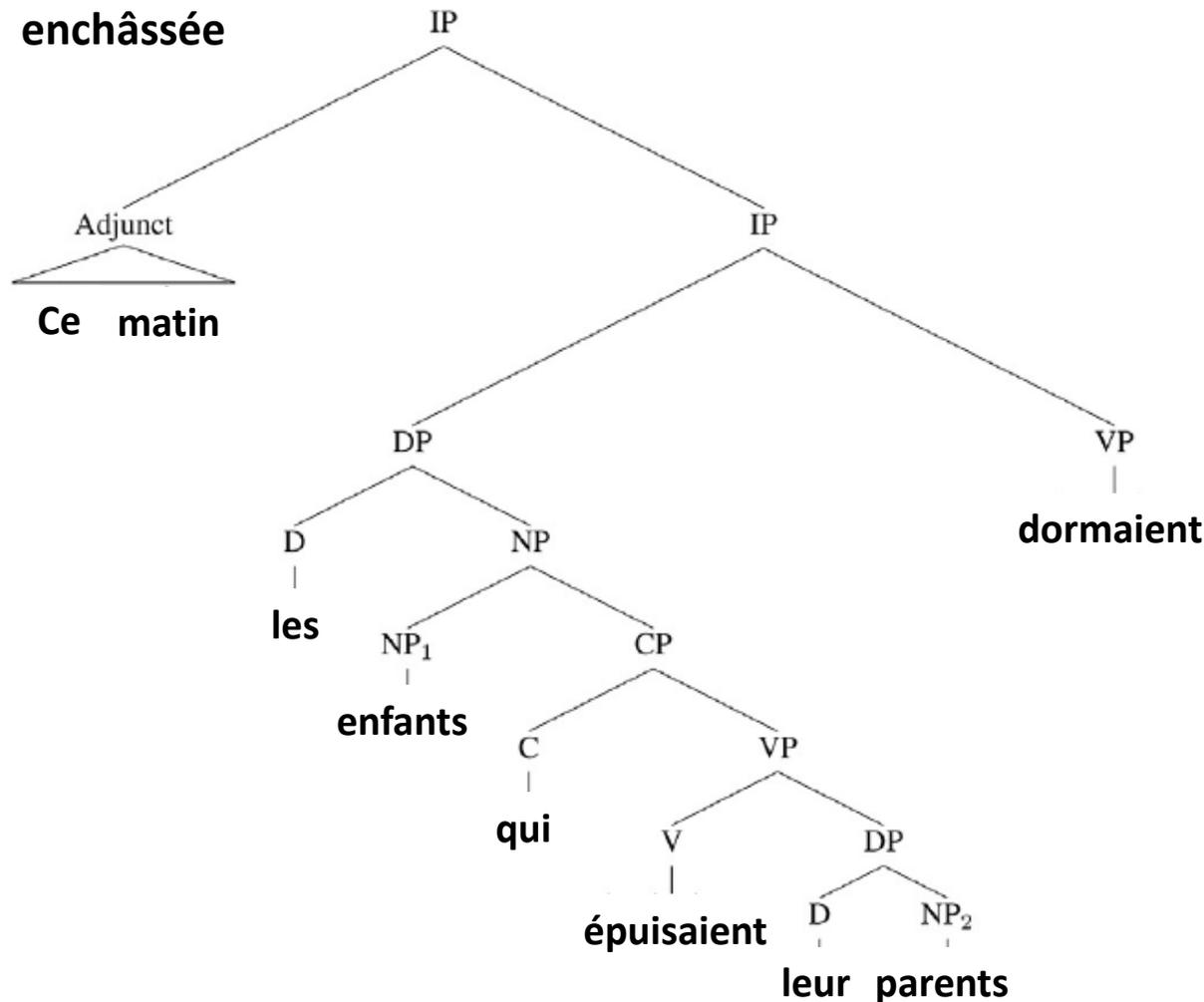
Expérience : enregistrement des réponses par IRM fonctionnelle pendant l'écoute d'une phrase suivie d'une requête (*probe*).



# Un réseau cérébral pour la manipulation des arbres syntaxiques

Pattamadilok, Dehaene & Pallier, Cortex, 2016

Condition  
enchâssée



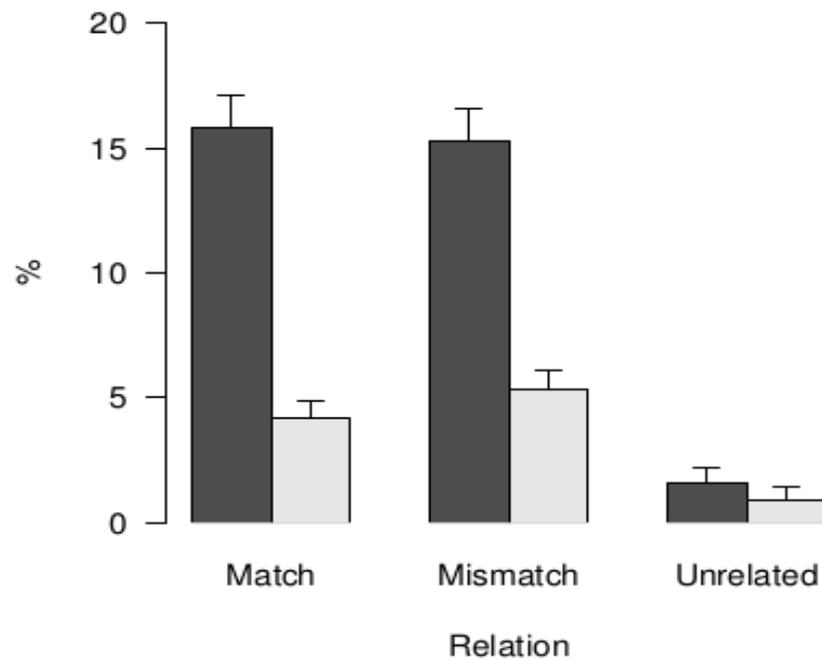
Probes

- Les enfants dormaient (Match)  
*The kids slept*
- Leurs parents dormaient (Mismatch)  
*Their parents slept*
- Le chien aboyait (Unrelated)  
*The dog barked*

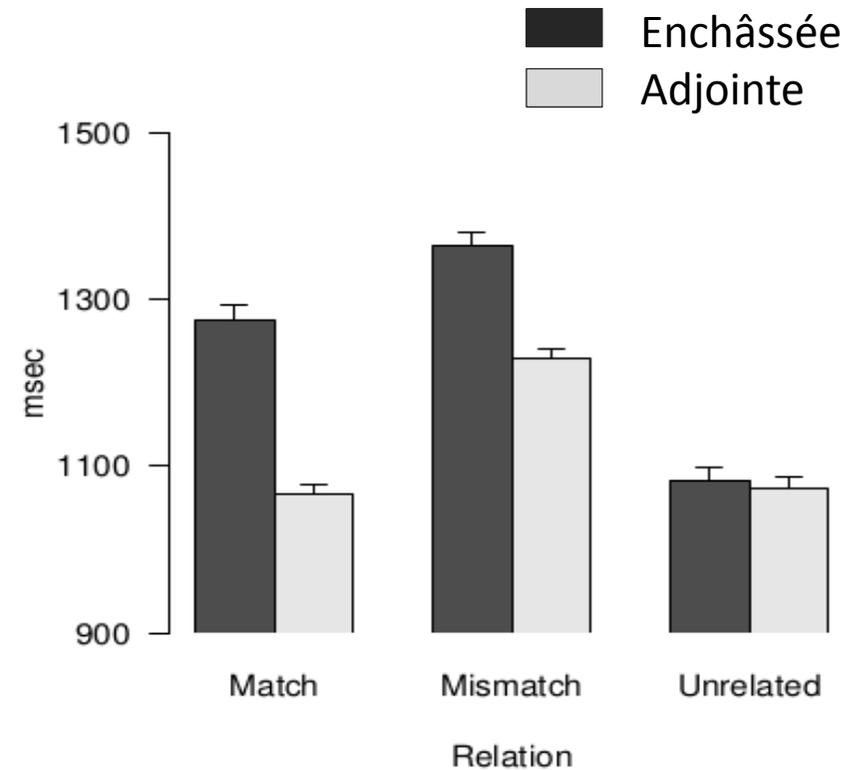
# Un réseau cérébral pour la manipulation des arbres syntaxiques

Pattamadilok, Dehaene & Pallier, Cortex, 2016

## Error Rates



## Reaction Times



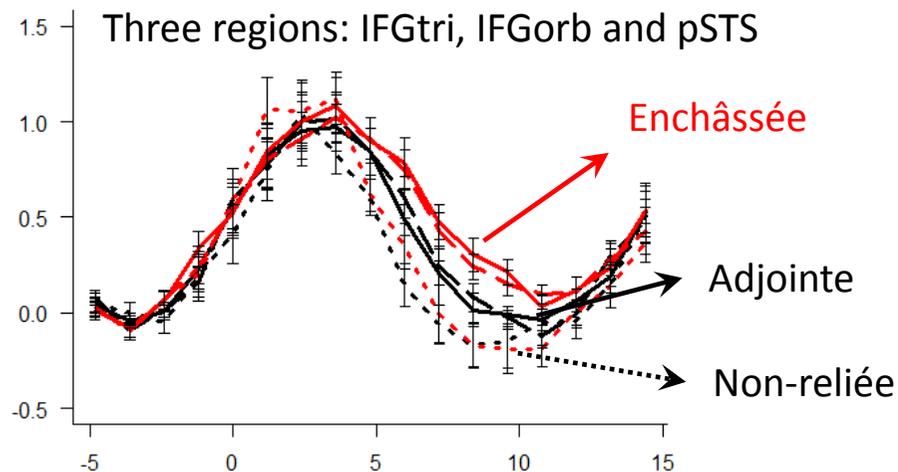
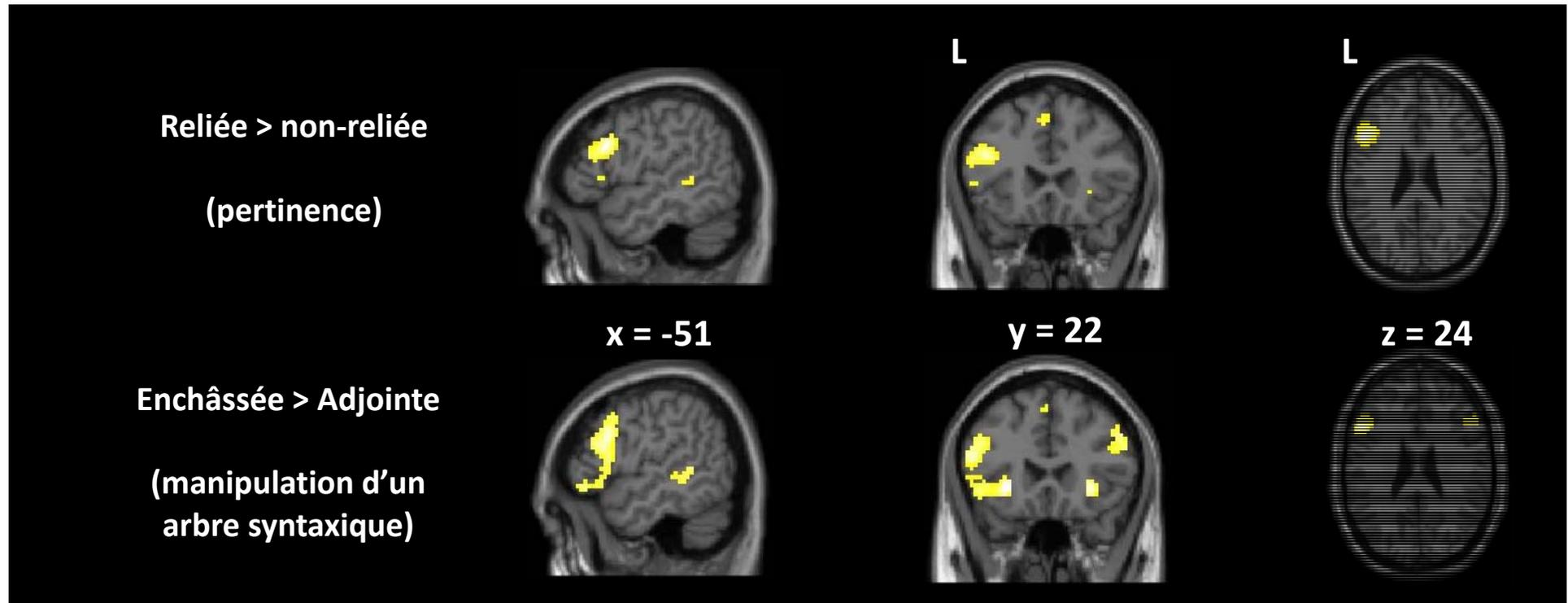
Comportement:

- Rejet rapide et facile des requêtes sans lien avec la phrase qui précède.
- Ralentissement marqué pour les propositions enchâssées

→ Résultats compatibles avec l'existence d'une opération d'extraction d'un sous-arbre syntaxique qui prend environ 200 millisecondes.

# Un réseau cérébral pour la manipulation des arbres syntaxiques

Pattamadilok, Dehaene & Pallier, Cortex, 2016

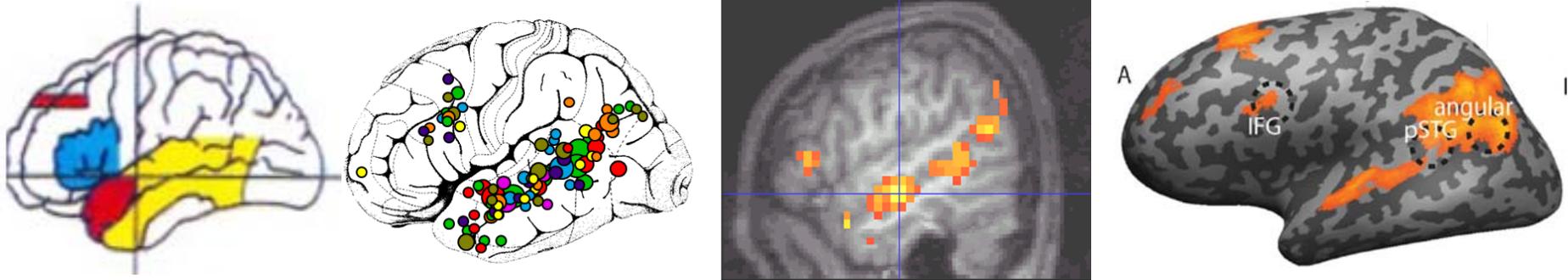


Dynamique de l'activité cérébrale:

- 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.

# Conclusions

L'écoute ou la lecture de la langue maternelle active un réseau reproductible d'aires cérébrales, latéralisé à l'hémisphère gauche.



Un sous-ensemble de ces régions s'active spécifiquement lors de la manipulation des arbres syntaxiques

semble indispensable à la compréhension des phrases où la syntaxe joue un rôle central.

