

Cours 2015:

Représentation cérébrale des structures linguistiques

Stanislas Dehaene

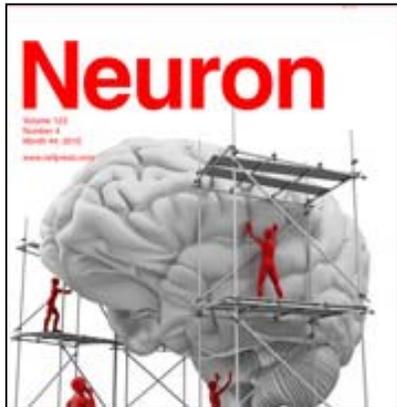
Chaire de Psychologie Cognitive Expérimentale

Cours n°1

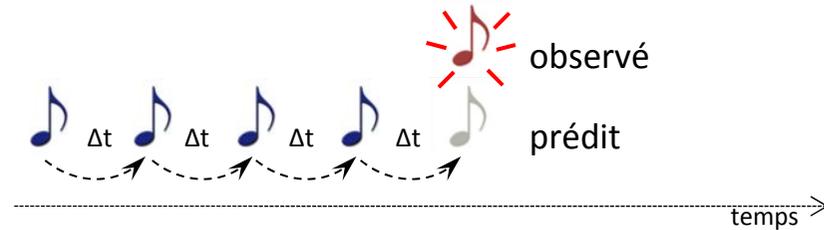
Introduction aux structures combinatoires du langage

Cinq types de représentation mentale 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*)

tokibu gikobagopilagikobatokibugopila ...

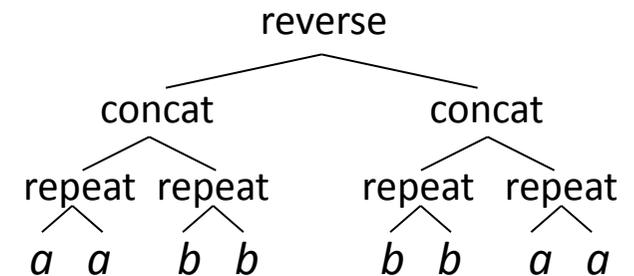
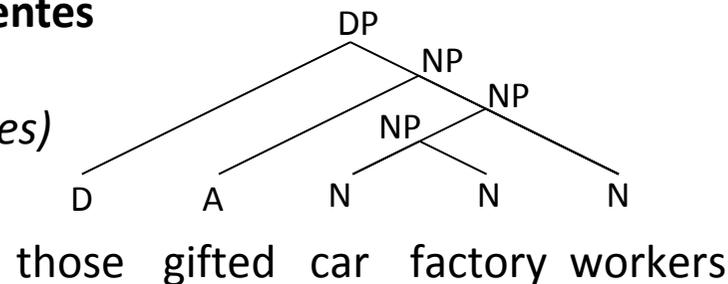
Codage de l'ordre
(*Ordinal knowledge*)



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*)



Nombreux arguments en faveur d'une organisation en syntagmes enchâssés dans des arbres syntaxiques

Sportiche, D., Koopman, H., & Stabler, E. (2013). *An Introduction to Syntactic Analysis and Theory* (1 edition). Hoboken: Wiley-Blackwell.

- Nombreux cas d'**ambiguïté syntaxique**:

(Black taxi) driver Un modèle possible: les règles de substitution $NP \rightarrow A NP$ et $NP \rightarrow NP N$ dont l'application récursive engendre des structures distinctes: $[A [N N]]$ ou $[[A N] N]$.

I shot an elephant in my pajamas... How it got in my pajamas, I don't know (Groucho Marx)

unlockable = un-(lock-able) ou (un-lock)-able

- Possibilité d'une **ellipse** ou d'une **substitution** de pratiquement n'importe quel syntagme:

“he [drove [to [this [big house]]]”

= “he drove to this one,” “he drove to it,” “he drove there,” “he did.”

- « **Mouvement** » (formation des questions, des phrases clivées, etc.) qui respectent la structure en syntagmes:

« Jean veut voir le chien » → « c'est voir le chien que Jean veut »; ou « c'est le chien que Jean veut voir »; ou encore « ce chien, Jean veut le voir »

- **Dépendances** à longue distance (accord et liage):

« Les voitures qui doublent ce camion sont rouges »

Structure « de surface » et structure(s) « profonde(s) »

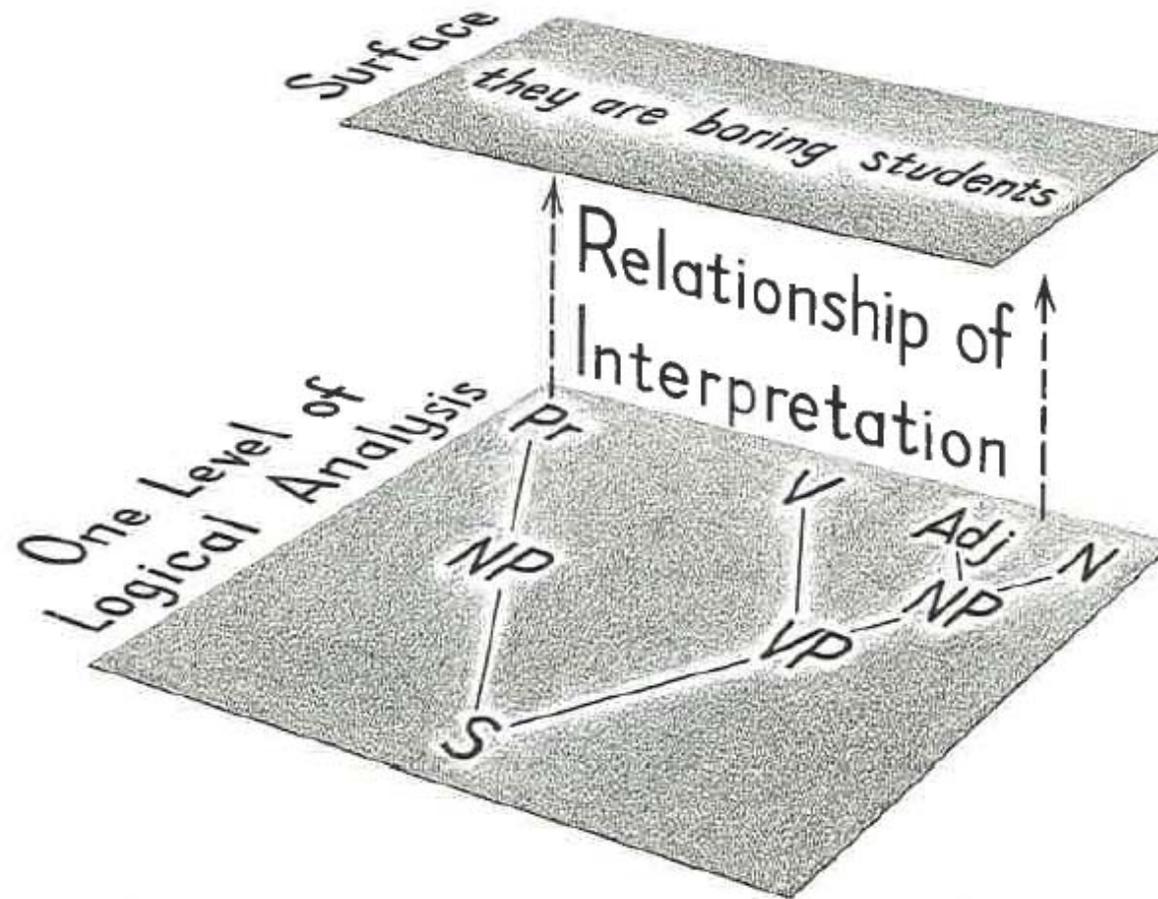


FIG. 7.5. Phrase-markers represent structural interpretations of strings of words.

Lenneberg, E. (1967). *Biological Foundations of Language*. New York: Wiley.

Langage et combinatoire: une très longue histoire

Pour Noam Chomsky, la propriété essentielle de la faculté de langage est l'« infinité discrète » (*discrete infinity*) -- la capacité, propre à l'espèce humaine, de former des représentations symboliques en les enchâssant de façon récursive pour composer des objets de pensée de complexité arbitraire.

« Le langage est, par essence, un système à la fois digital et infini. A ma connaissance, aucun autre système biologique ne possède de telles propriétés » (Noam Chomsky, *Linguistics and Cognitive Science: Problems and Mysteries*. 1991)

Le langage fait « un usage infini de moyens finis » (Wilhelm von Humboldt, 1767-1835).

René Descartes (Discours de la Méthode, 1637):

« S'il y avait [des machines] qui eussent la ressemblance de nos corps, et imitassent autant nos actions que moralement il serait possible, nous aurions toujours deux moyens très certains pour reconnaître qu'elles ne seraient point pour cela de vrais hommes. Le premier est que jamais elles ne pourraient user de paroles ou d'autres signes **en les composant**, comme nous faisons pour déclarer aux autres nos pensées. Car on peut bien concevoir qu'une machine soit tellement faite qu'elle profère des paroles, et même qu'elle en profère quelques-unes à propos des actions corporelles qui causeront quelques changements en ses organes ; comme si en la touchant en quelque endroit, qu'elle demande ce qu'on veut lui dire, si en un autre, qu'elle crie qu'on lui fait mal, et choses semblables ; mais non pas qu'elle les **arrange diversement** pour répondre au **sens** de tout ce qui se dira en sa présence, ainsi que les hommes les plus hébétés peuvent faire. »

Langage et combinatoire: une très longue histoire

Charles Darwin (La filiation de l'homme, 1871): Ce qui distingue l'homme des animaux inférieurs, ce n'est pas la faculté de comprendre les sons articulés, car, comme chacun le sait, les chiens comprennent bien des mots et bien des phrases. (...). Ce n'est pas la faculté d'articuler, car le perroquet et d'autres oiseaux possèdent cette faculté. Ce n'est pas, enfin, la simple faculté de rattacher des sons définis à des idées définies, car il est évident que certains perroquets qui ont appris à parler appliquent sans se tromper le mot propre à certaines choses et rattachent les personnes aux événements. Ce qui distingue l'homme des animaux inférieurs, c'est **la faculté infiniment plus grande qu'il possède d'associer ensemble les plus divers des sons et des idées**, et cette faculté dépend évidemment du **développement extraordinaire de ses facultés mentales**.

Antoine Arnault et Claude Lancelot (Grammaire générale et raisonnée, dite Grammaire de Port Royal, 1660): Première tentative d'extraction de principes *universels* du langage, "les raisons de ce qui est commun à toutes les langues et des principales différences qui s'y rencontrent".

Combinatoire des sons : « Cette invention merveilleuse de composer de vingt-cinq ou trente sons cette infinie variété de mots, qui, n'ayant rien de semblable en eux-mêmes à ce qui se passe dans notre esprit, ne laissent pas d'en découvrir aux autres tout le secret, et de faire entendre à ceux qui n'y peuvent pénétrer, tout ce que nous concevons, et tous les divers mouvements de notre âme. »

Combinatoire des mots en propositions, puis en raisonnements.

André Martinet (1908-1999) et la double articulation du langage

La productivité du système linguistique est issue d'une hiérarchie de deux niveaux combinatoires: phonèmes et morphèmes.

Niveau 1. Formation des signifiants élémentaires (morphèmes) par **combinaison de phonèmes** (plus petites unités qui distinguent deux mots)

- Exemple: port/tort; part/tard;
- Nous produisons d'autres distinctions *phonétiques* (plusieurs allophones d'un même phonème), mais ces distinctions ne sont pas nécessairement utilisées par le système phonologique
- Les règles phonotactiques définissent les combinaisons possibles.

Niveau 2. Formation des mots et des phrases par **combinaison de morphèmes** (plus petites unités qui portent un sens)

- Exemple: Trois chatons miauleront.
- Chaque morphème porte une relation signifiant-signifié élémentaire
- Leur combinatoire permet d'exprimer une infinité de structures

Andrea Moro: « Une longue rangée de lézards traversa le désert sans même s'arrêter pour rêvasser ».

Noam Chomsky: « Colorless green ideas sleep furiously ».

Ferdinand de Saussure (1857-1913): Linéarité des signifiants, enchâssement des syntagmes

Second principe de Ferdinand de Saussure: « Caractère linéaire du signifiant »

« Le signifiant, étant de nature auditive, se déroule dans le temps seul et a les caractères qu'il emprunte au temps : a) *il représente une étendue*, et b) *cette étendue est mesurable dans une seule dimension* : c'est une ligne. »

« Ce principe est évident, mais il semble qu'on ait toujours négligé de l'énoncer, sans doute parce qu'on l'a trouvé trop simple ; cependant il est fondamental et les conséquences en sont incalculables ; son importance est égale à celle de la première loi. Tout le mécanisme de la langue en dépend. Par opposition aux signifiants visuels (signaux maritimes, etc.), qui peuvent offrir des complications simultanées sur plusieurs dimensions, les signifiants acoustiques ne disposent que de la ligne du temps ; leurs éléments se présentent l'un après l'autre ; ils forment une chaîne. »

Notion de syntagme:

“Le syntagme se compose donc toujours de deux ou plusieurs unités consécutives (par exemple: re-lire; contre tous; la vie humaine; Dieu est bon; s'il fait beau temps, nous sortirons, etc.).”

“La notion de syntagme s'applique non seulement aux mots, mais aux groupes de mots, aux unités complexes de toute dimension et de toute espèce (mots composés, dérivés, membres de phrase, phrases entières)”

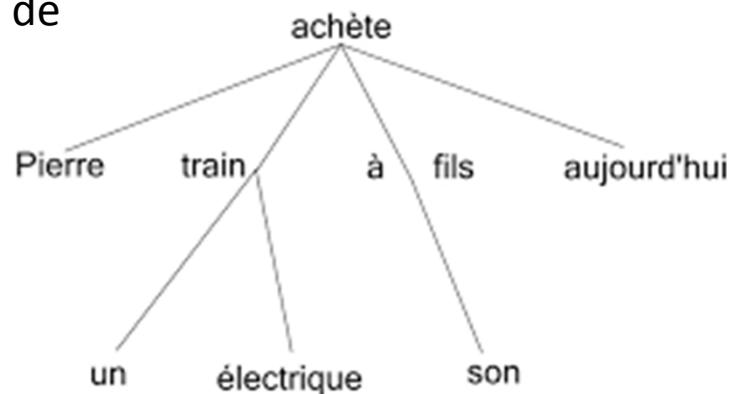
Lucien Tesnière (1893-1954) et les « stemmata »

Esquisse d'une syntaxe structurale, Klincksieck, Paris 1953.
Éléments de syntaxe structurale, Klincksieck, Paris 1959.

De l'étude comparée de très nombreuses langues, Tesnière déduit qu'il doit exister une structure cachée qui explique la structure visible des énoncés.

Il introduit une représentation de la phrase sous la forme d'un arbre hiérarchique (*stemma*, pluriel *stemmata* = *guirlande*, *arbre généalogique*).

Ces arbres tiennent compte de plusieurs sortes de relations structurales : dépendance hiérarchique, coordination, et anaphore.



Noam Chomsky : plusieurs générations de théories syntaxiques

Chomsky 1: Grammaire transformationnelle et règles de réécriture (« 3 models », 1956)

Hiérarchie de Chomsky, fondamentale en informatique (théorie des langages formels)

- caractère inadéquat des chaînes de Markov
- Introduction des « phrase-structure grammars » (enchâssement de règles de réécriture)
- Notion de *transformation* de cette *structure profonde*, pour former par exemple des questions, des phrases passives, etc.

Chomsky 2: Principes et paramètres (« Pisa lectures », 1981)

Face à la multiplication de règles *ad hoc* propres à chaque langue, Chomsky (avec notamment Rizzi) tente d'identifier des *principes universels* et des *variations paramétriques* minimales qui distinguent les langues.

Exemples: Paramètre du sujet nul; Paramètre de direction de la tête (*head-directionality parameter: head initial* ou *head final*)

Chomsky 3: Le programme minimaliste (1993) et la notion de *Merge*

Tous les syntagmes seraient issus d'un seul mécanisme central : l'opération *Merge* (Fusion) qui, à partir de deux éléments quelconques, produit une paire non-ordonnée :

La fusion ne peut se produire que si les éléments possèdent des traits qui se correspondent (*feature matching*) :

par ex: le verbe « aimer » est +transitif.

La paire hérite de la catégorie de l'un des deux enfants.



Le système phonologique: un succès majeur de l'analyse linguistique

Selon la théorie phonologique, les phonèmes de toutes les langues du monde s'organiseraient en un système de **traits phonétiques** (*phonetic features*), souvent binaires.

L'école de Prague
et l'analyse structurale du langage

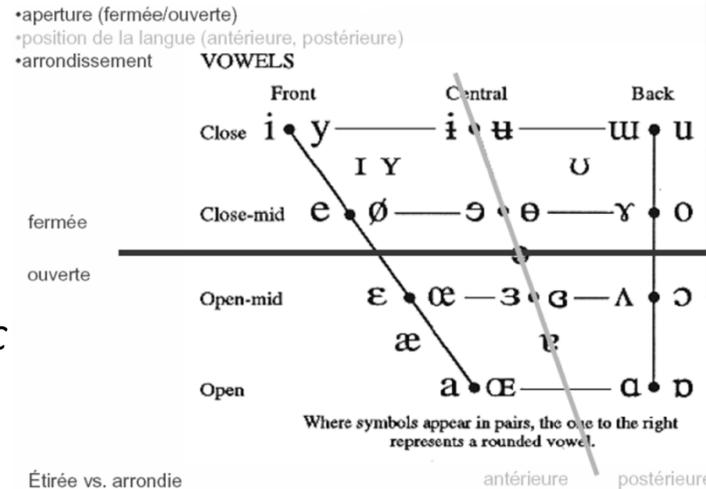


Roman Jakobson
(1896-1982)



Nikolai Trubetzkoy
(1890-1938).
Grundzüge der Phonologie (1939)

Trapèze vocalique:



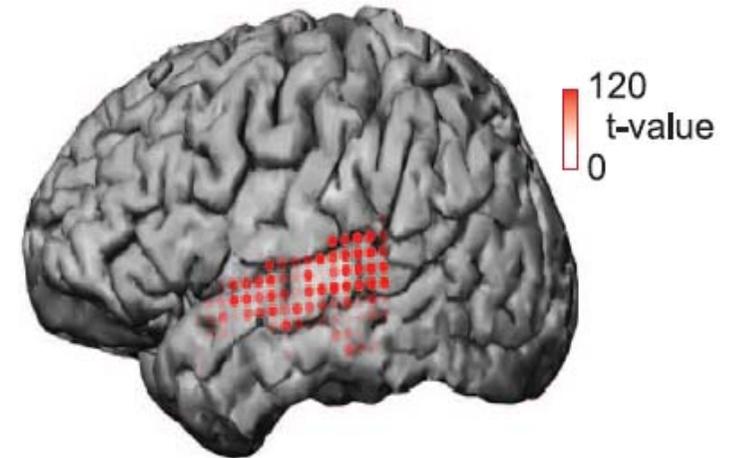
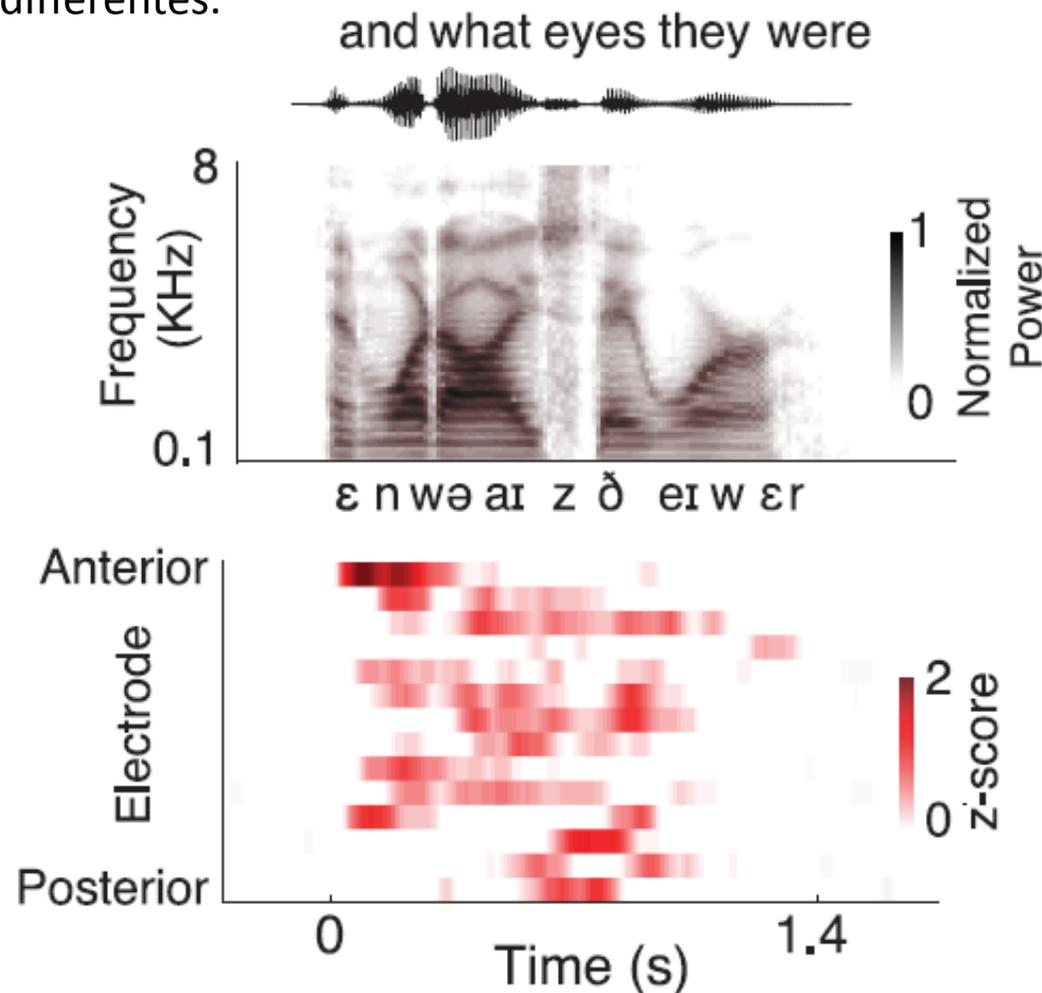
MODE D'ARTICULATION			LIEU D'ARTICULATION									
Type de consonne selon le mouvement	Passage de l'air	Vibration des cordes vocales	Bi-labiale	labio-dentale	Apico-dentale	Apico-alvéolaire	Pré-dorso-alvéolaire	Pré-dorso-pré-palatale	médio-palatale	Dorso-palatale ou vélaire	Post-dorso-uvulaire	
OCCLUSIVE	ORAL	NON-VOISEE	p		t					k		
		VOISEE	b		d					g		
	NASAL	VOISEE	m		n				ɲ	(ŋ)		
CONSTRUCTIVE	ORAL	TYPÉ DE CONSTRICTME										
		FRICATIVE	NON-VOISEE		f			s	ʃ			
			VOISEE		v			z	ʒ			
		LATERALE	VOISEE				l					
VIBRANTE	VOISEE									r		

Les mécanismes cérébraux de l'organisation en traits phonétiques: Mesgarani, N., Cheung, C., Johnson, K., & Chang, E. F. (2014). Phonetic feature encoding in human superior temporal gyrus. *Science*, 343(6174), 1006–1010.

Le cortex temporal supérieur répond à la parole continue

Mesgarani, N., Cheung, C., Johnson, K., & Chang, E. F. (2014). Phonetic feature encoding in human superior temporal gyrus. *Science*, 343(6174), 1006–1010.

Enregistrements de très haute densité chez six patients.
Réponses à 500 phrases énoncées par 400 personnes différentes.



Exemple de disposition des électrodes chez l'un des patients.

La couleur représente un test statistique des réponses à la parole par rapport au silence.

Analyse des réponses dans la bande gamma (75-150 Hz), qui reflète la moyenne locale des décharges neuronales

Les réponses varient:

- Suivant les électrodes
- Et suivant les moments de la phrase.

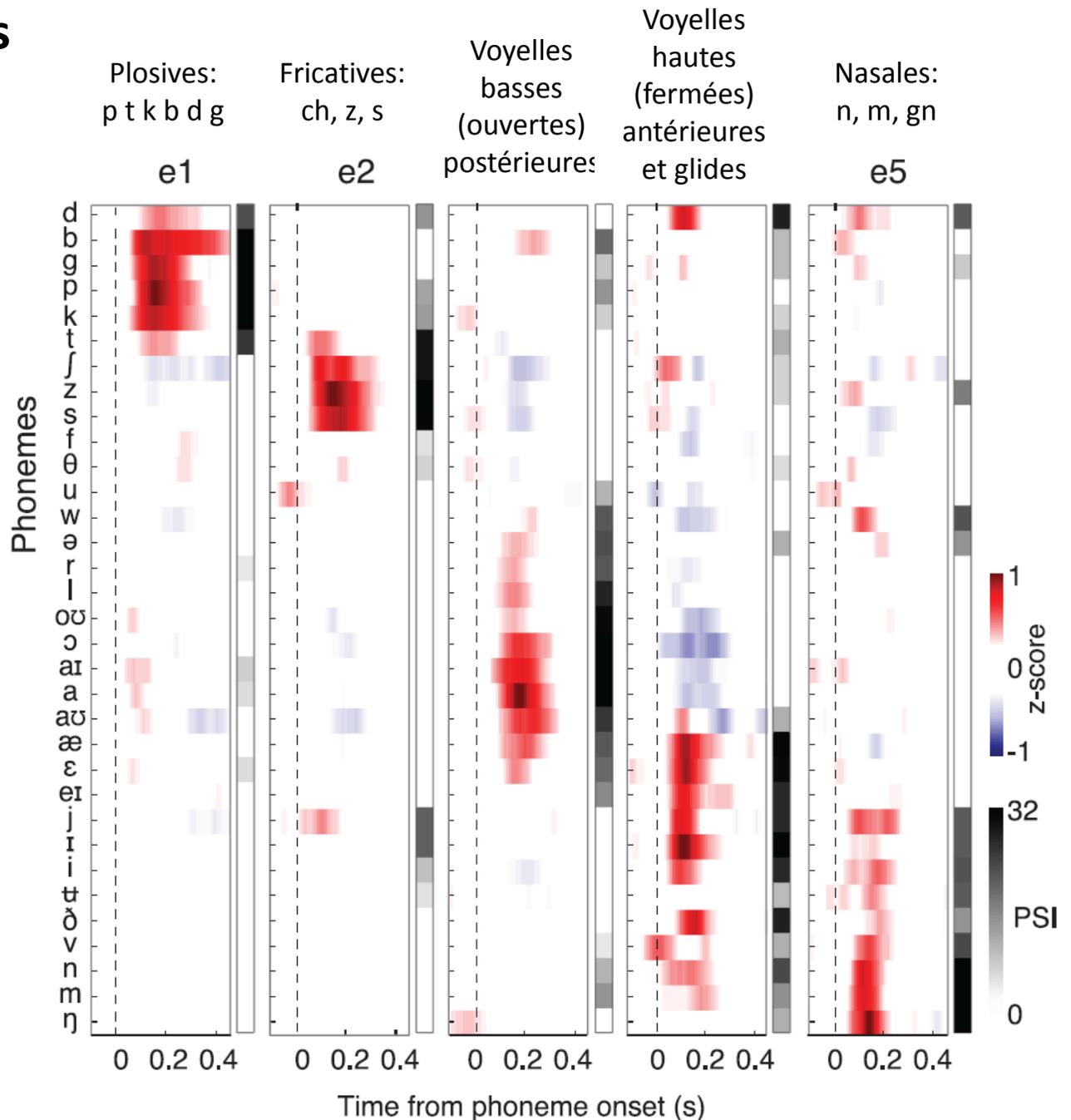
Différentes électrodes répondent à différents groupes de phonèmes

Recalage des essais sur le début de chaque phonème.

La réponse varie considérablement selon le phonème présenté.

Chaque électrode semble répondre à un petit nombre de phonèmes.

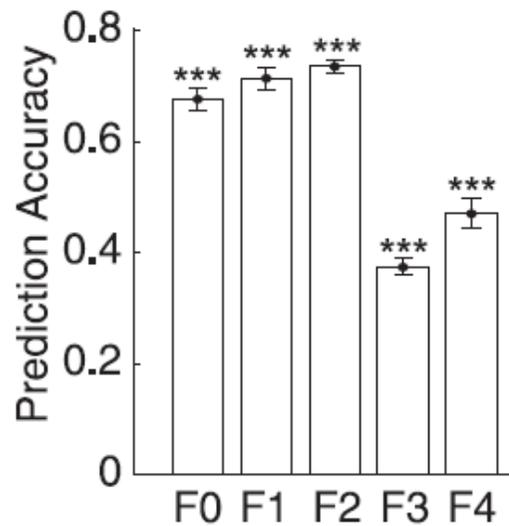
Ceux-ci forment des catégories non-arbitraires, qui reflètent l'organisation en traits phonétique.



Code neural des voyelles et des consonnes

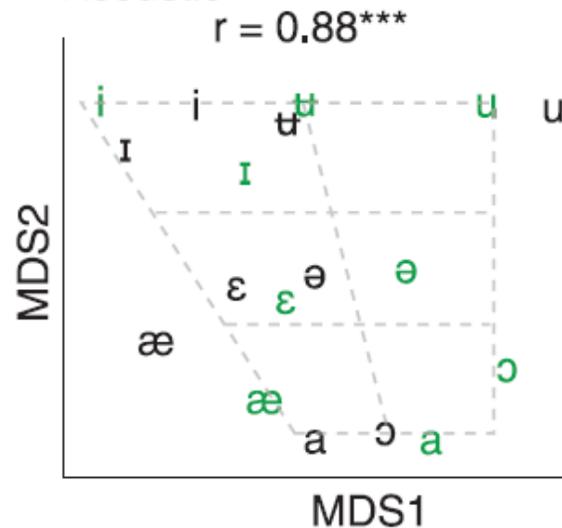
Voyelles: décodage des formants.

De nombreuses électrodes codent pour une combinaison particulière de F1 et F2 (intégration spectrale)



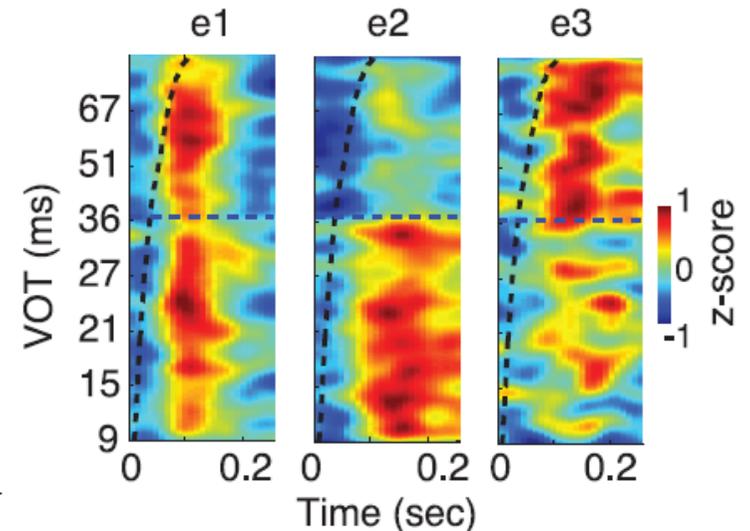
Correspondance entre l'espace neurophysiologique et acoustique (*multidimensional scaling*)

Neural
Acoustic



On retrouve l'organisation bidimensionnelle en lieu d'articulation et degré d'ouverture

Consonnes: réponse non-linéaire à la durée d'établissement du voisement (*voice onset time, VOT*), qui distingue les plosives voisées (b,d,g = VOT court) et non-voisées (p,t,k = VOT long)

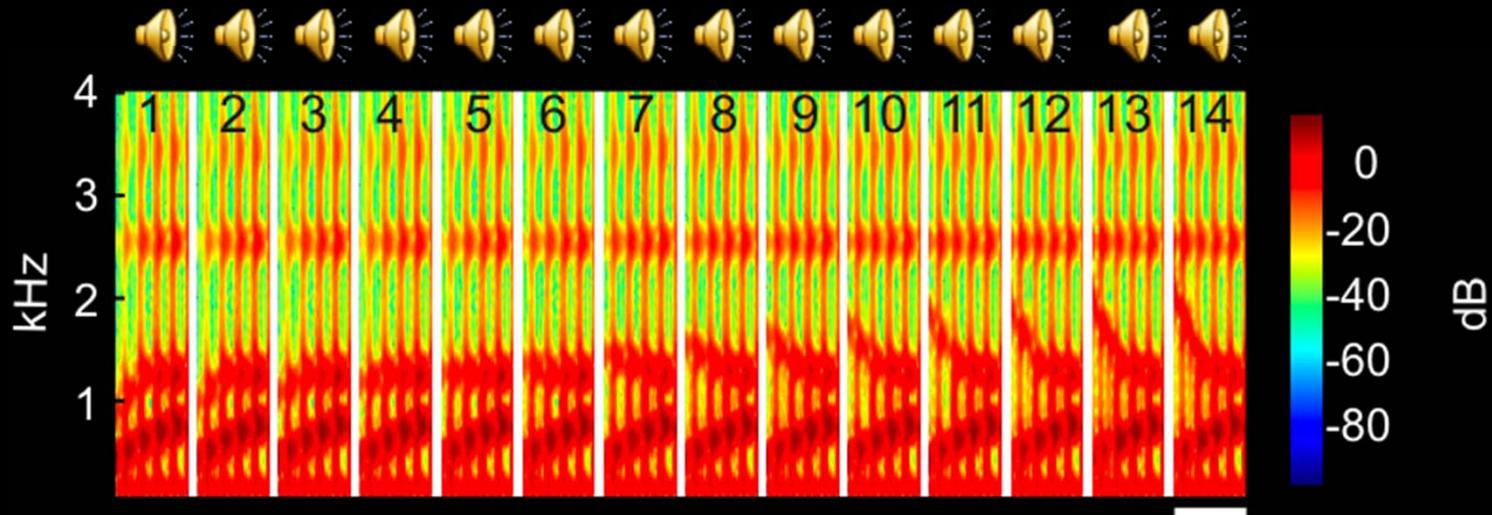


Conclusion:

- Le cortex temporal supérieur code les traits phonétiques.
- Ces réponses résultent d'une analyse acoustique (formants, VOT, durée, etc), mais :
 - Réponse non-linéaire alignée précisément aux frontières phonétiques (catégorisation)
 - Combinaison non-linéaire de plusieurs traits acoustiques, précisément ajustée à la représentation des sons du langage.

Une représentation neuronale catégorielle des consonnes

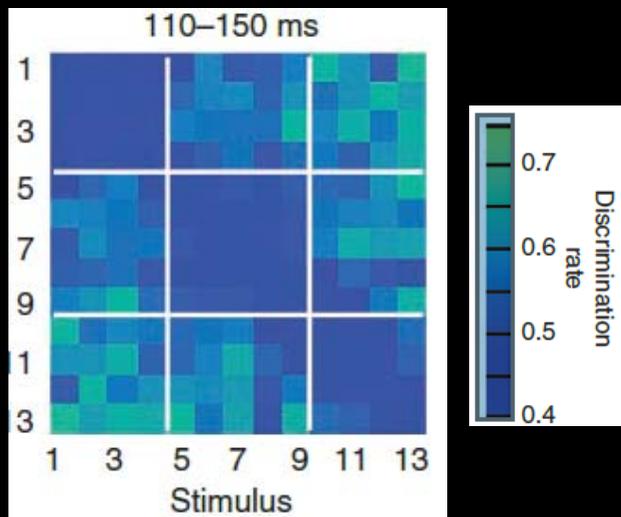
Chang, E. F., Rieger, J. W., Johnson, K., Berger, M. S., Barbaro, N. M., & Knight, R. T. (2010). Categorical speech representation in human superior temporal gyrus. *Nat Neurosci*, 13(11), 1428–32.



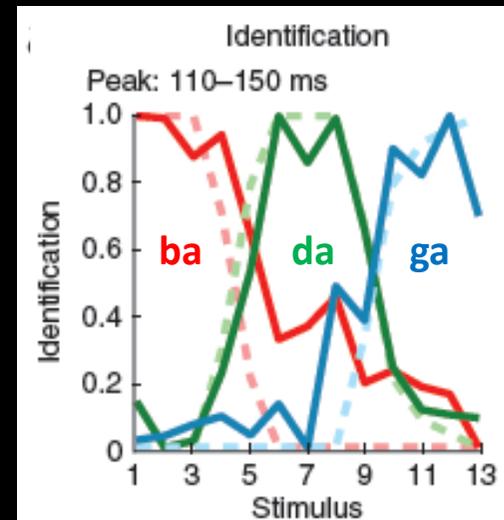
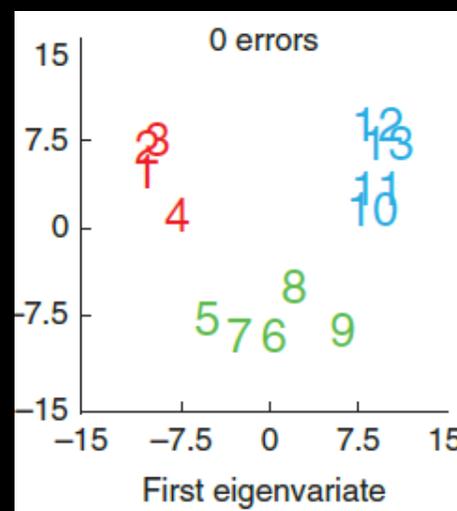
50ms

Correspondance entre catégories neuronales et perception subjective

Matrice de performance en classification multivariée

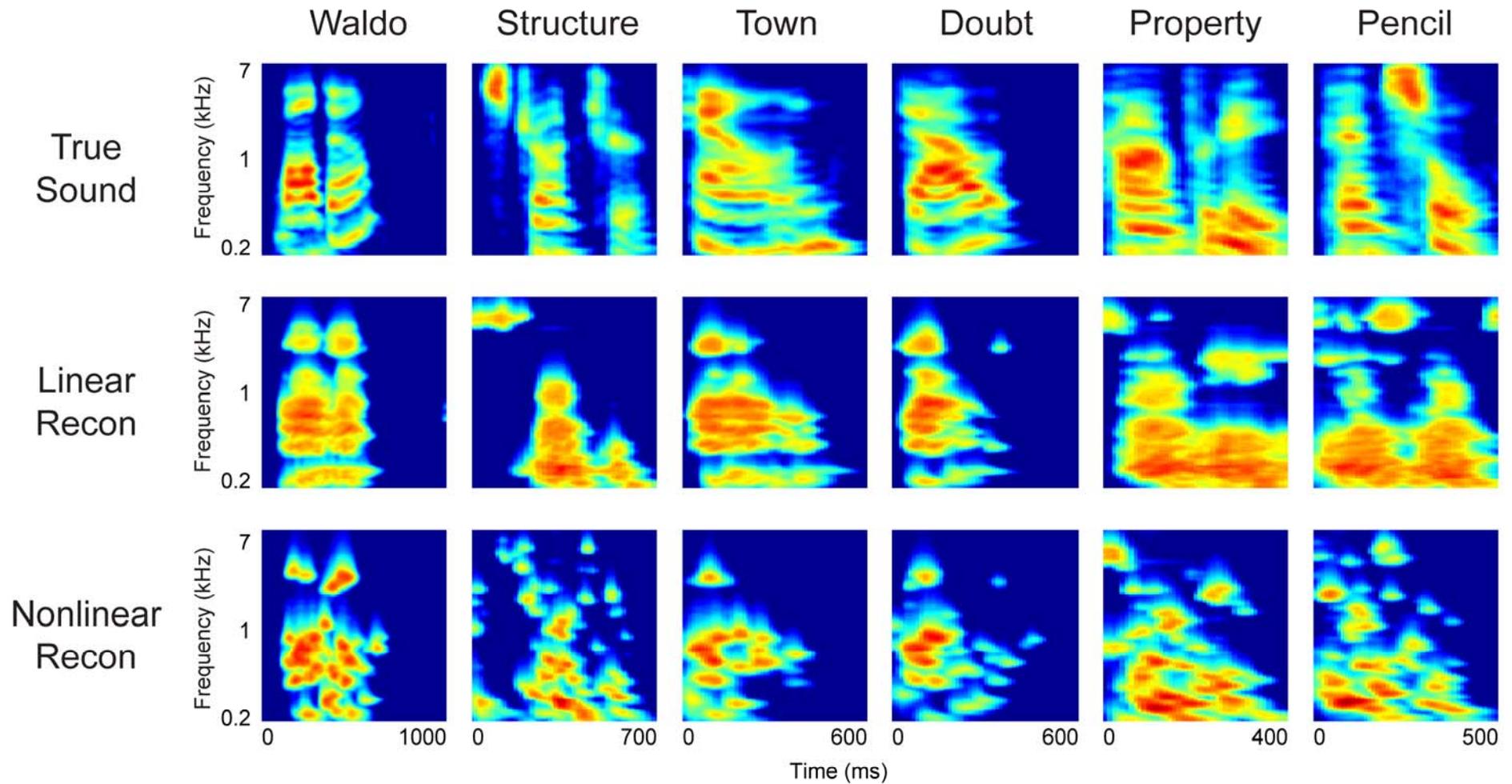


Multi-dimensional scaling et K-means clustering.



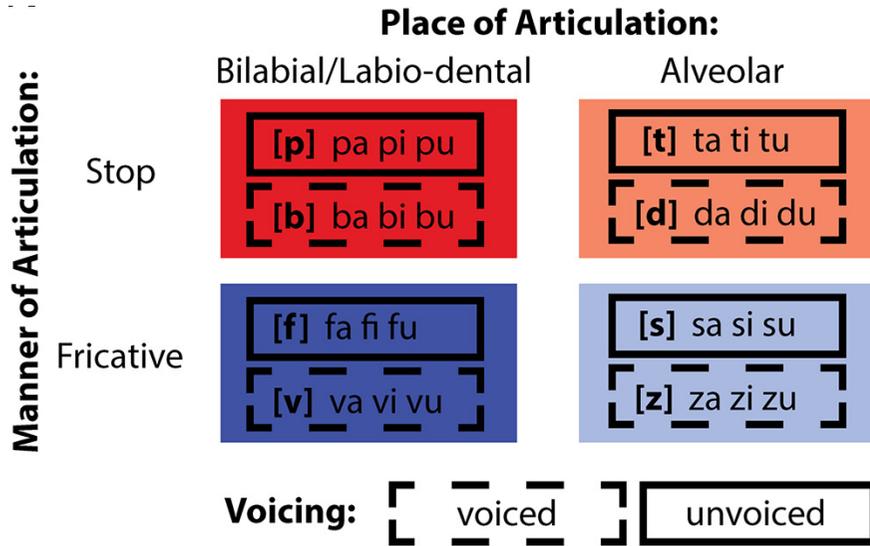
Ce qui est décodé peut être recodé!

Pasley BN, David SV, Mesgarani N, Flinker A, Shamma SA, et al. (2012) Reconstructing Speech from Human Auditory Cortex. PLoS Biol 10(1): e1001251.



Généralisation sur la base des traits phonologiques

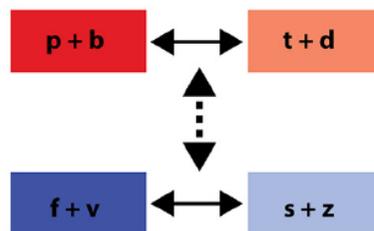
Correia, J. M., Jansma, B. M. B., & Bonte, M. (2015). Decoding Articulatory Features from fMRI Responses in Dorsal Speech Regions. *The Journal of Neuroscience*, 35(45), 15015–15025.



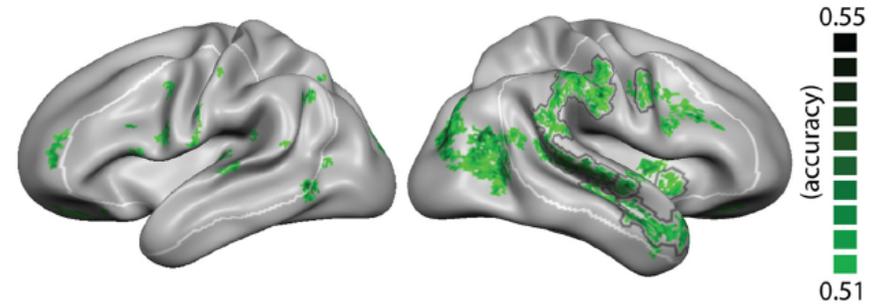
IRM fonctionnelle de haute résolution à 3T (voxels isotropes de 2 mm).

Un classificateur est entraîné à discriminer, par exemple la place d'articulation parmi les plosives (p/t) et on examine sa généralisation aux fricatives (f/s)

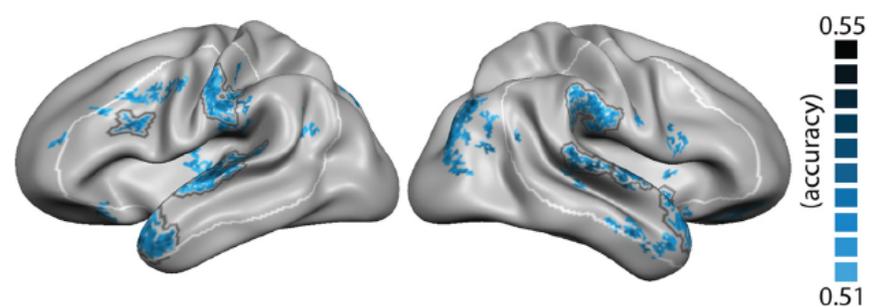
Generalize Place of Articulation independent from variation across Manner of Articulation



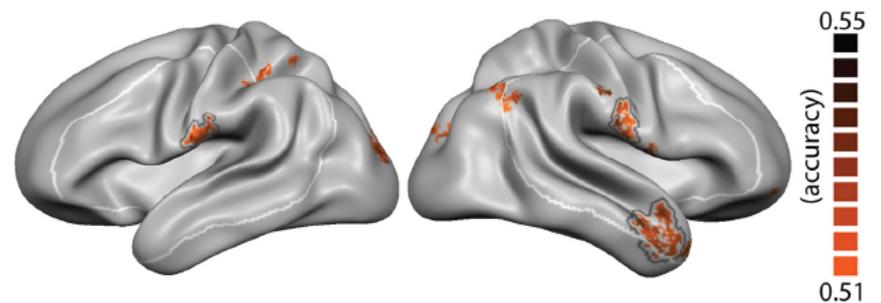
A - Generalize Place of Articulation (radius = 20 mm)



B - Generalize Manner of Articulation (radius = 20 mm)



C - Generalize Voicing (radius = 20 mm)



Conclusions

L'analyse de la **représentation corticale des phonèmes** soutient fortement les conclusions issues de près d'un siècle de recherches en **phonologie**:

- Existence d'un « espace vocalique »
- Existence de traits phonétiques discrets, catégoriels, dont les combinaisons composent les consonnes de la langue

De nombreuses questions restent ouvertes: Universalité des traits phonétiques d'une langue à l'autre? Prédications et erreurs de prédiction? Mécanismes des règles phonotactiques?

A un niveau plus élevé, l'**analyse syntaxique** suggère l'existence d'un autre type d'organisation, fondé sur des syntagmes enchâssés sous formes d'arbres.

→ L'existence de cette hypothétique représentation arborescente peut-elle être confirmée au niveau neuronal?

→ Quels sont les aires cérébrales impliquées ?

→ Comment cette représentation est-elle codée au niveau neuronal?

→ Comment est-elle calculée en temps réel lors de l'écoute d'une phrase?

Principales publications et ouvrages de référence

- Baker, M. (2001). *The atoms of language*. New York: Basic Books.
- Chomsky, N. (1956). Three models for the description of language. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2(3), 113–124.
- 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.
- 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. <http://doi.org/10.1016/j.plrev.2014.04.005>
- Fromkins, V., Rodman, R., & Hyams, N. (2010). *An Introduction to Language, 9th Edition* (9th edition). Boston, MA: Wadsworth Cengage Learning.
- Hale, J. (2015). *Automaton Theories of Human Sentence Comprehension*. Sanford, California: Center for the Study of Language and Inf.
- Kemmerer, D. (2014). *Cognitive Neuroscience of Language*. New York, NY: Psychology Press.
- Lenneberg, E. (1967). *Biological Foundations of Language*. New York: Wiley.
- Marcus, G. F. (2001). *The Algebraic Mind - Integrating Connectionism & Cognitive Science*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Moro, A. (2008/2015). *The boundaries of Babel (2nd edition)*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Pinker, S. (1995). *The language instinct*. London: Penguin.
- Sportiche, D., Koopman, H., & Stabler, E. (2013). *An Introduction to Syntactic Analysis and Theory*. Hoboken: Wiley-Blackwell.