



# *Tutoriel : introduction à la psycholinguistique et à la neurolinguistique*

Identification des bases neurales des primitives de la phonologie et de la syntaxe pour l'étude du traitement de la parole

Carlo CECCHETTO & Mauro VIGANÒ

*13 février 2024*

# Paradigmes de recherche

# Le langage dans le cerveau

- Lors des premiers cours, nous avons montré quelques exemples de localisation de catégories et de fonctions linguistiques dans différentes zones du cerveau (localisationnisme).
- Ces études visent à fournir une **carte** de la fonction linguistique dans le cerveau. Les questions de recherche sont les suivantes :
  - Que voulons-nous localiser ?
  - Où est-il localisée en termes de zones corticales ?
- Ces résultats sont utiles à des fins cliniques et pour aborder/répondre à des problèmes théoriques.

# Le langage dans le cerveau

- Une carte du cerveau fournit des informations sur l'*endroit* où le langage est traité dans le cerveau, mais pas sur la *manière* dont il est traité.
- Il s'agit simplement d'une image des différentes activations pour différents stimuli.
- Il est *descriptif* mais non *explicatif*.

# Lien entre deux domaines

Jusqu'à présent, nous n'avons pas encore vraiment tenté de faire le lien entre le domaine neuroscientifique et le domaine linguistique.

Pour ce faire, nous devons décrire les primitives des deux domaines :

- Quels sont les éléments de l'anatomie et de la physiologie du cerveau qui sont pertinents pour l'étude des processus cognitifs ?
- Quelles composantes (abstraites) du langage sont susceptibles d'avoir une représentation spécifique dans le cerveau ?
- Comment relier ces deux domaines ?

# Lien entre deux domaines

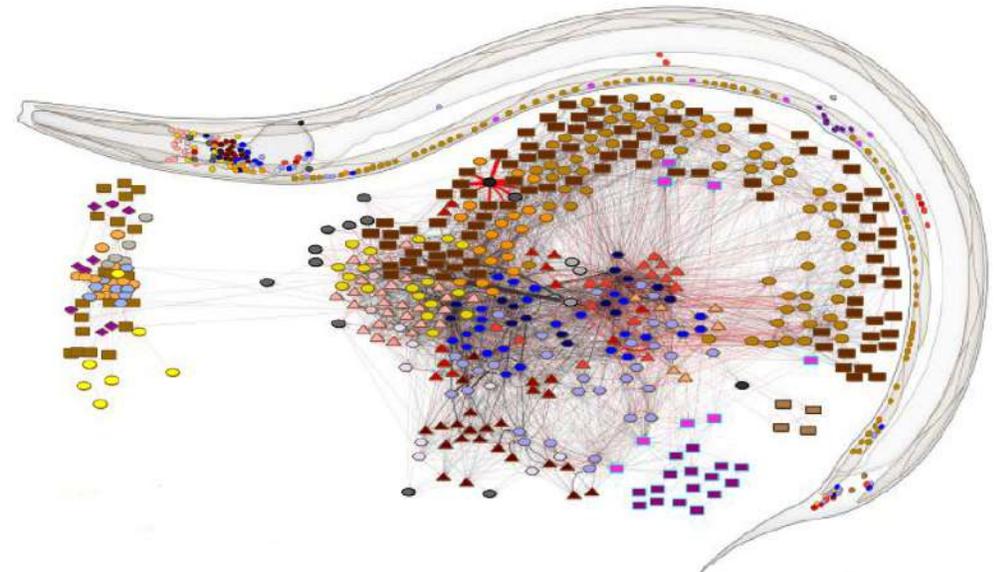
Table 1. Examples of hypothesised primitive objects/operations.

|            | Linguistics          | Neuroscience                    |
|------------|----------------------|---------------------------------|
| Objects    | Distinctive feature  | Dendrite/spine                  |
|            | Timing slot          | Neuron                          |
|            | Morpheme             | Cortical microcircuit           |
|            | Phrase               | Cortical column                 |
| Operations | Feature spreading    | Long term<br>potentiation (LTP) |
|            | Merge                | Oscillation                     |
|            | Concatenation        | Adaptation                      |
|            | Semantic composition | synchronisation                 |

# Deux options

## 1) L'approche réductionniste

- Nous devrions essayer de faire correspondre chaque entité linguistique à une représentation spécifique dans le cerveau, en suivant la fonction linguistique au niveau des neurones.
- Cette approche est problématique : même avec des animaux beaucoup plus simples (par exemple, *Caenorhabditis elegans*), il n'est pas possible d'établir un lien biunivoque et déterministe entre un neurone unique (ou un groupe de neurones) et un comportement spécifique.



# Deux options

## 2) L'approche opérationnelle

- Nous devrions plutôt mettre en correspondance des opérations sur des opérations en trouvant la bonne granularité d'analyse entre les deux domaines.
- L'accent est mis sur les processus/opérations plutôt que sur les entités linguistiques (par exemple, segmentation sur segmentation, récursion sur récursion, etc.)
- Nous devrions prendre en compte non seulement les données neuroanatomiques, mais aussi les données *neurophysiologiques* (EEG et/ou MEG) pour rendre compte des processus linguistiques dans le cerveau.
- Nous devrions chercher à fournir un modèle *explicatif* de la manière dont nous construisons nos représentations linguistiques à partir des stimuli physiques que nous percevons (la parole).

# Les trois niveaux de Marr

## COMPUTATIONAL

---

What is the goal of the computation, why is it appropriate, and what is the logic of the strategy by which it can be carried out?

## ALGORITHMIC

How can this computational theory be implemented? In particular, what is the representation for the input and output, and what is the algorithm for the transformation?

## IMPLEMENTATIONAL

How can the representation and algorithm be realized physically?

---

Marr, D. (1982). *Vision W.H.* New York: Freeman and Company.

# Les trois niveaux de Marr

L'illustration de Marr : une caisse enregistreuse.

- Au niveau **computationnel**, une caisse enregistreuse fait de l'arithmétique, de sorte que « notre première tâche est de maîtriser la théorie de l'addition ».
- Au niveau **algorithmique**, « nous pourrions choisir des chiffres arabes pour les représentations, et pour l'algorithme, nous pourrions suivre les règles habituelles qui consistent à ajouter d'abord les chiffres les moins significatifs et à "transporter" si la somme dépasse neuf ».
- Au niveau d'**implémentation**, nous sommes confrontés à des questions telles que celles-ci : « Les chiffres sont-ils représentés par des positions sur une roue métallique à dix encoches, ou par des nombres décimaux codés en binaire, représentés par les états électriques d'un circuit logique numérique ? ».

# Les trois niveaux de Marr et le langage

- Marr a explicitement soutenu que « la théorie de la grammaire transformationnelle de Chomsky (1965) est une véritable théorie computationnelle au sens défini précédemment » et il a placé la distinction compétence/performance de Chomsky comme la différence entre le « niveau computationnel » et le « niveau algorithmique ».
- En termes plus modernes, les théories syntaxiques sont des théories du langage au niveau computationnel, tandis que les théories psycholinguistiques de la compréhension ou de la production sont des descriptions au niveau algorithmique de la manière dont les connaissances linguistiques peuvent être utilisées.

# Le tutoriel d'aujourd'hui

Les études que Mauro va décrire pourraient être vu comme des tentatives de relier directement le niveau computationnel celui d'implémentation, à savoir la recherche d'un câblage de circuit neuronal de certaines opérations linguistiques (y inclus *Merge*). Cette tentative est extrêmement intéressante et mérite d'être poursuivie, mais il convient de garder à l'esprit deux mises en garde potentielles.

# Contourner un niveau ?

Si l'approche de Marr reste un guide utile, un problème potentiel avec ce que vous êtes sur le point d'écouter est qu'il s'agit d'une tentative de passer du niveau computationnel au niveau d'implémentation en passant par le niveau algorithmique.

# Passer d'un niveau à l'autre

- Une autre chose à garder à l'esprit est que, comme Marr l'a lui-même souligné, pour une théorie computationnelle donnée, « il existe un large choix de représentations.... [et] même pour une représentation fixe, il y a souvent plusieurs algorithmes possibles pour effectuer le même processus ». Par exemple, il existe différents algorithmes pour faire une somme.
- De plus, pour un algorithme computationnel donné, il existe différentes implémentations physiques possibles : « L'enfant qui additionne méthodiquement deux nombres de droite à gauche, en reportant un chiffre si nécessaire, utilise peut-être le même algorithme que celui mis en œuvre par les fils et les transistors de la caisse enregistreuse... mais la réalisation physique de l'algorithme est tout à fait différente ».

# Deux exemples d'approche opérationnelle

- Des stimuli physiques à la phonologie : comment nous construisons notre représentation phonologique à partir du stimulus auditif (parole).
- Des stimuli physiques à la phonologie et à la syntaxe : comment nous sommes capables d'analyser le continuum auditif de la parole connectée en unités linguistiques discrètes (segmentation) et comment nous sommes capables d'assembler ces unités en entités hiérarchiquement plus complexes (*Merge ?*).

# La phonologie dans le cerveau

# Phonétique et phonologie

- Dans les langues vocales, la parole est constituée de sons.
- Les phonèmes sont la plus petite unité contrastive (son) qui peut modifier le sens d'un mot : la plus petite unité linguistique.

**CAT**

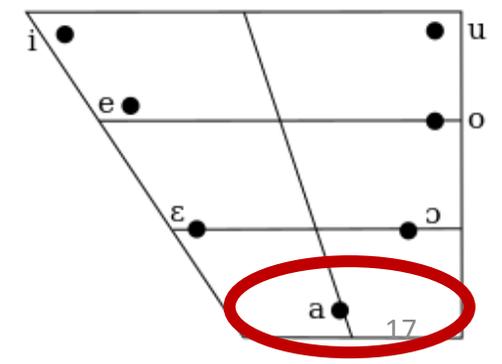
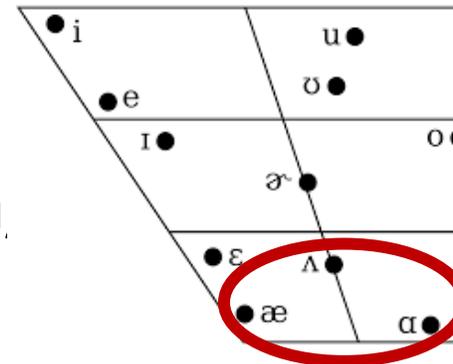
**/k/ - /æ/ - /t/**

**CUT**

**/k/ - /ʌ/ - /t/**

- Des langues différentes ont des phonèmes différents : il existe une variation interlinguistique en ce qui concerne les sons considérés comme distinctifs de la langue.

- *Ex. en anglais : /p/ /ʌ/ /æ/ - en italien /a*

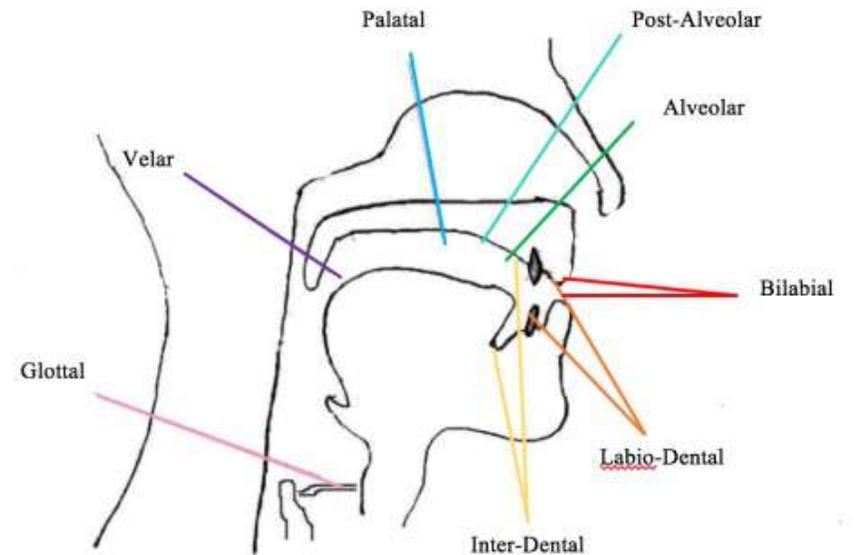


# Caractéristiques phonologiques

- Une façon de faire la distinction entre les différents phonèmes d'une langue est de les analyser en termes de **traits phonologiques**, ou de caractéristiques distinctives (Jakobson, 1941).
- Ces traits classent les phonèmes en fonction de la présence ou de l'absence d'une propriété (ils sont spécifiés par des valeurs binaires).
  - Par exemple, le trait [voix] permet de distinguer les deux consonnes /p/ (trait : [-voix]) et /b/ (trait : [+voix]).
- Grâce à ce système, tous les phonèmes peuvent être décrits par la liste de valeurs correspondant à chaque trait phonologique.
  - Par exemple, /b/ peut être défini par [+consonne], [-continuité], [+voix], [+labiale], ...

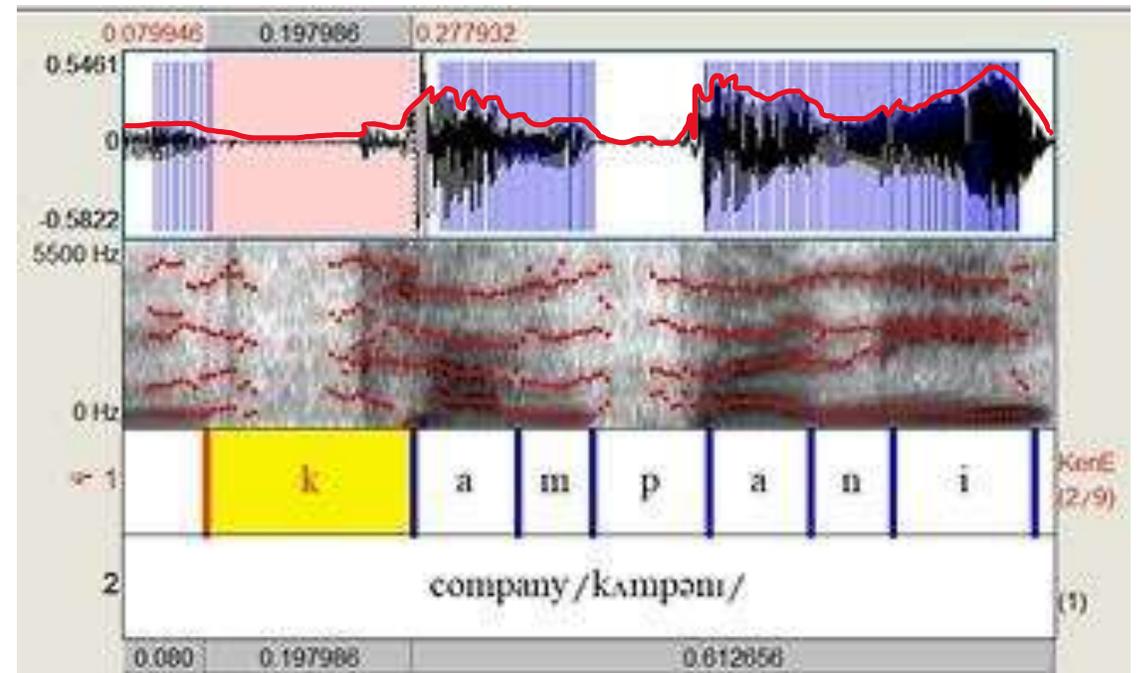
# Caractéristiques phonologiques

- Par rapport aux phonèmes, les traits phonologiques sont plus "universels".
- La définition des différents traits phonologiques dépend largement des propriétés articulatoires du son.
  - *Lieu d'articulation* : par exemple, [labial], [coronal], [dorsal], [radical], [glottal].
  - *Mode d'articulation* : par exemple, [continu], [nasal], [strident], [latéral].



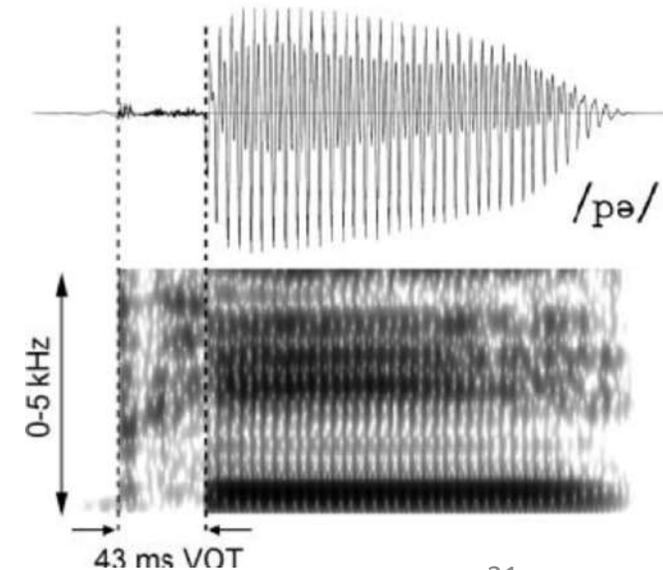
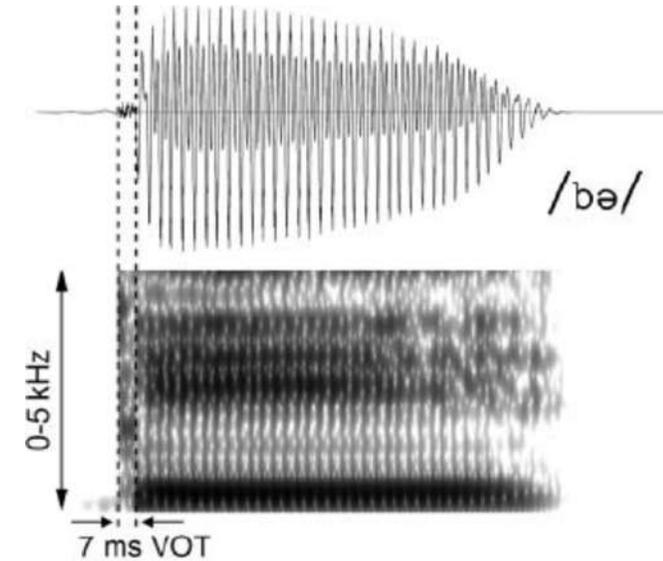
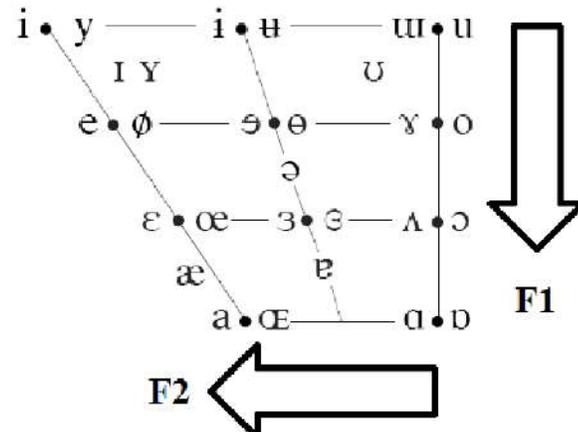
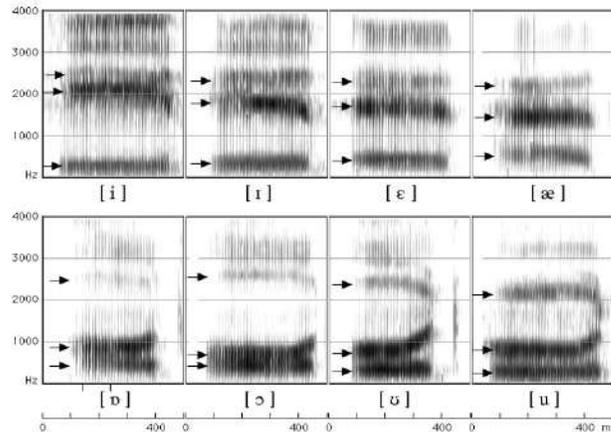
# Phonétique et phonologie

- **Spectrogramme** : représentation visuelle du spectre des fréquences d'un signal tel qu'il varie dans le temps.
- Il identifie les différences acoustiques entre les différents sons et phonèmes.
- **Enveloppe de la parole** : fonction de l'amplitude du son dans le temps.



# Phonétique et phonologie

- Les consonnes et les voyelles présentent des caractéristiques acoustiques distinctes qui sont en corrélation avec les caractéristiques phonologiques du phonème correspondant.
- *Ex.* Le VOT (temps d'apparition de la voix) est le corrélat acoustique du trait  $[\pm\text{voix}]$ .
- *Ex.* Pour les voyelles, F1 et F2 sont en corrélation avec la taille et l'avancement respectivement.



# La phonologie dans le cerveau

- Ces catégories abstraites (phonèmes et/ou traits) ont-elles un codage neuronal ?
- Ou sont-elles dérivées du codage neuronal des propriétés physiques (spectrales) des stimuli auditifs ?

## **Phonetic Feature Encoding in Human Superior Temporal Gyrus**

Nima Mesgarani,<sup>1\*</sup> Connie Cheung,<sup>1</sup> Keith Johnson,<sup>2</sup> Edward F. Chang<sup>1†</sup>

28 FEBRUARY 2014 VOL 343 SCIENCE [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org)

# L'expérience

- Électrocorticographie à haute densité (ECoG) pendant la neurochirurgie de l'épilepsie (six participants).
- Localisation dans le cerveau : Gyrus temporal supérieur (STG) gauche.
- Stimuli : échantillons de discours naturels représentant un large éventail de locuteurs américains de l'anglais (500 phrases prononcées par 400 personnes).

# Électrocorticographie

- Il s'agit d'une procédure invasive réalisée au cours d'une intervention neurochirurgicale pour cartographier individuellement les différentes fonctions sur la surface corticale.
- Elle est généralement pratiquée au cours du traitement chirurgical de l'épilepsie pharmaco-résistante et des tumeurs cérébrales.
- L'objectif est d'optimiser le rapport entre la radicalité chirurgicale et les résultats fonctionnels.
- Une autre application est la recherche neurophysiologique, car cette technique offre une résolution spatiale et temporelle optimale.

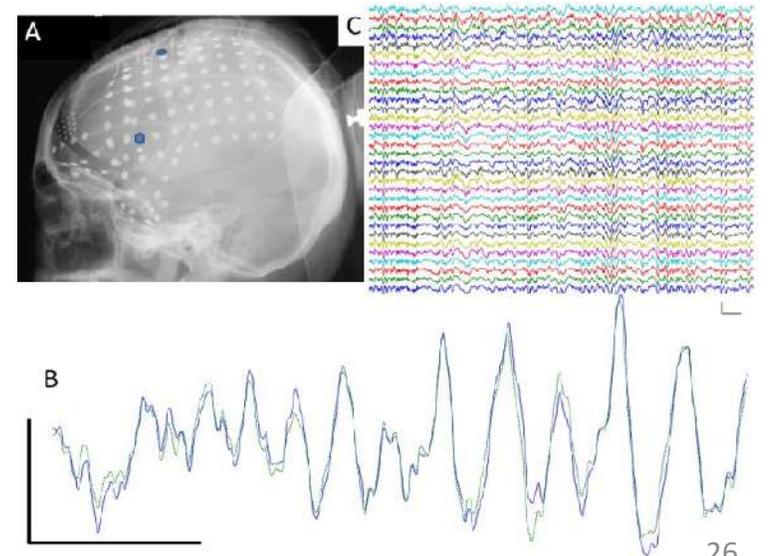
# Électrocorticographie

- L'examen est réalisé pendant les interventions chirurgicales en état d'éveil : le patient est réveillé et des tâches fonctionnelles lui sont administrées.
- Deux approches sont possibles :
  1. Des stimulations corticales avec une entrée électrique dans différentes zones sont administrées pendant l'exécution des tâches fonctionnelles : si la stimulation interfère avec le comportement cible, nous pouvons conclure que cette zone est impliquée dans cette fonction.



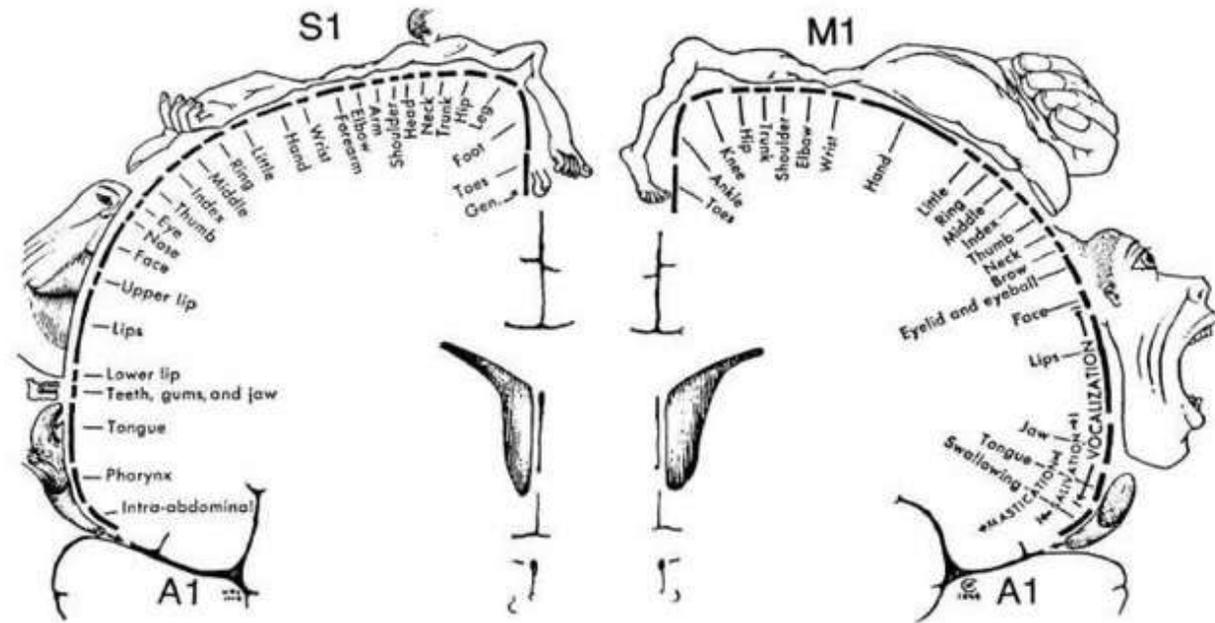
# Électrocorticographie

- L'examen est réalisé pendant les interventions d'éveil : le patient est réveillé et des tâches fonctionnelles sont administrées.
- Deux approches sont possibles :
  1. Enregistrement de l'activité électrocorticale (ECoG) : un réseau d'électrodes est placé sur la surface corticale et l'activité électrique du cerveau est directement enregistrée pendant l'exécution de tâches fonctionnelles.



# Électrocorticographie

- Cette technique a été fondamentale dans l'histoire de la neurophysiologie (mais aussi de la neuropsychologie et de la neurolinguistique), notamment dans le cadre de l'approche localisationniste.
- Wilder Penfield (années 40 et 50) : homoncules moteur et sensoriel.



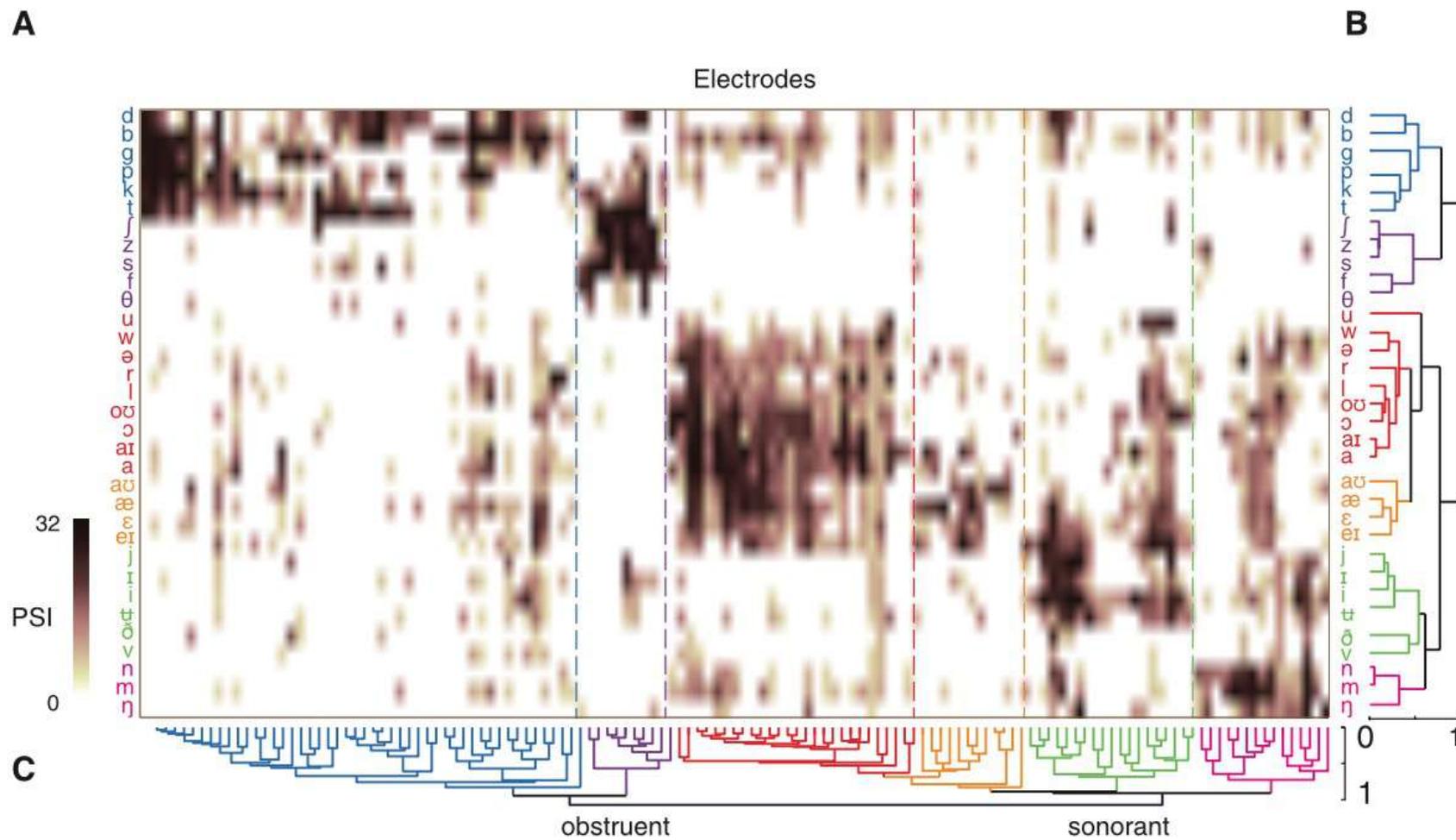
# Résultats

- Pour chaque électrode, un indice de sélectivité des phonèmes (PSI) a été calculé : nombre de phonèmes pour lesquels l'électrode affiche une réponse distincte (plage : 0-33).
- Les électrodes ayant un PSI moyen plus élevé sont des sites sensibles à la parole par rapport au silence : elles se trouvent dans le STG moyen et postérieur.
- Principale constatation : la plupart des électrodes ne sont pas sensibles à un seul phonème mais à des groupes de phonèmes.
  - *Mais quels groupes ?*

# Regroupement des phonèmes

- Nous avons pu vérifier que ces groupes de phonèmes correspondent à la classification fournie par les traits phonologiques.
  - C'est une bonne idée, mais même si nous trouvions des différences significatives dans les PSI entre les différents groupes basés sur les traits, nous ne pourrions pas exclure une explication différente/meilleure pour ces différences.
- Une technique de regroupement naïve basée sur le degré de similitude des PSI entre les électrodes a fourni le groupe le mieux adapté.
- Les groupes d'électrodes identifiés par cette technique correspondent aux groupes de phonèmes définis par leurs traits.

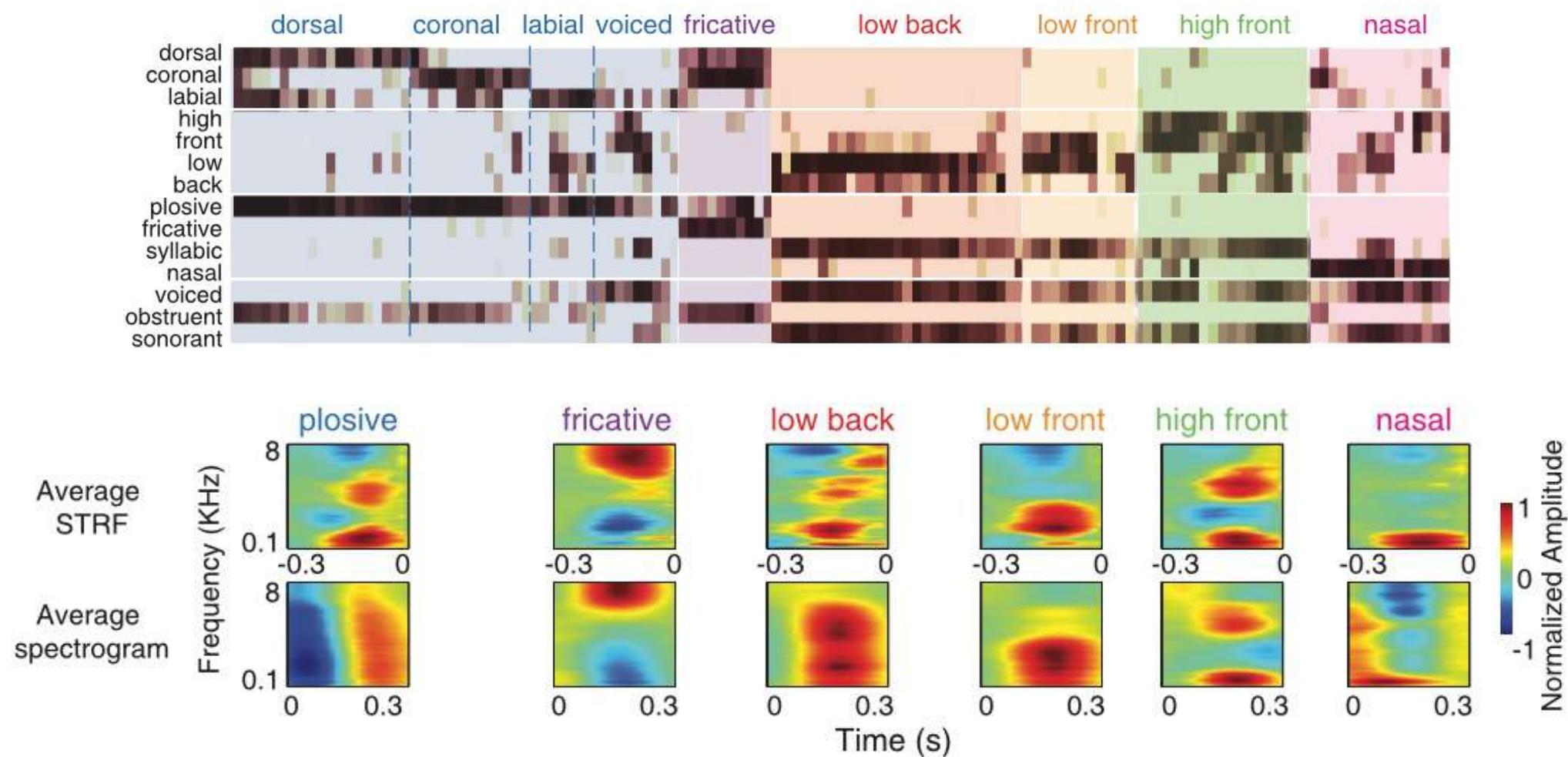
# Résultats



# Résultats

- Un autre résultat important concerne la réactivité des électrodes aux caractéristiques acoustiques du stimulus (parole).
- La plus grande sélectivité de la réponse neuronale a été constatée pour certains paramètres acoustiques spécifiques (par exemple, VOT ; F1 et F2) qui expriment les caractéristiques physiques des traits phonologiques.
- Parmi les traits phonologiques, la plus grande sélectivité dans la réponse neuronale a été trouvée pour les traits qui définissent le mode d'articulation (par rapport au lieu d'articulation).

# Résultats



# Résumé

- Aucune preuve de sélectivité locale élevée pour les phonèmes uniques dans la réponse neuronale.
- Dans le STG moyen et postérieur, il existe un codage topologique des caractéristiques des sons de la parole (traits) :
  - Cette constatation découle d'un regroupement naïf.
  - Le regroupement est justifié par les caractéristiques acoustiques des stimuli (la manière d'articuler montrant la plus grande sélectivité).
  - Cette représentation en terme de traits est plus universelle d'une langue à l'autre et peut rendre compte de la coarticulation et du chevauchement temporel que les modèles de perception de la parole basés sur les phonèmes.

# Retour à la phonologie dans le cerveau

Par rapport aux études précédentes que nous avons présentées (sur le lexique et la syntaxe), cette étude :

- permet une **localisation fine** de la représentation phonologique au niveau de la population neuronale ;
- décrit un **processus physiologique** qui *explique la* capacité humaine :
  - d'extraire une représentation "universelle" (les traits phonologiques) des caractéristiques acoustiques du continuum de la parole ;
  - de combiner ces informations pour identifier les phonèmes spécifiques à une langue.

De la parole à la phonologie et à  
la syntaxe

# Faisons un pas en avant

- Un autre processus fondamental pour la compréhension du langage à partir de la parole est la **segmentation** (analyse syntaxique).
- La parole connectée est un son continu, tandis que la structure de la langue est caractérisée par la combinaison d'unités discrètes.
- Nous voulons décrire comment nous sommes capables de segmenter la parole connectée en unités linguistiques significatives et de combiner hiérarchiquement ces unités dans des composés structurellement plus complexes.

L'étude

# Cortical tracking of hierarchical linguistic structures in connected speech

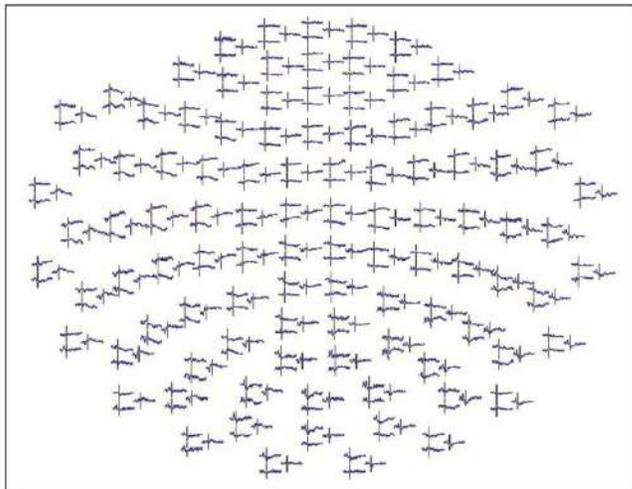
Nai Ding<sup>1,2</sup>, Lucia Melloni<sup>3-5</sup>, Hang Zhang<sup>1,6-8</sup>, Xing Tian<sup>1,9,10</sup> & David Poeppel<sup>1,11</sup>

VOLUME 19 | NUMBER 1 | JANUARY 2016 **NATURE NEUROSCIENCE**

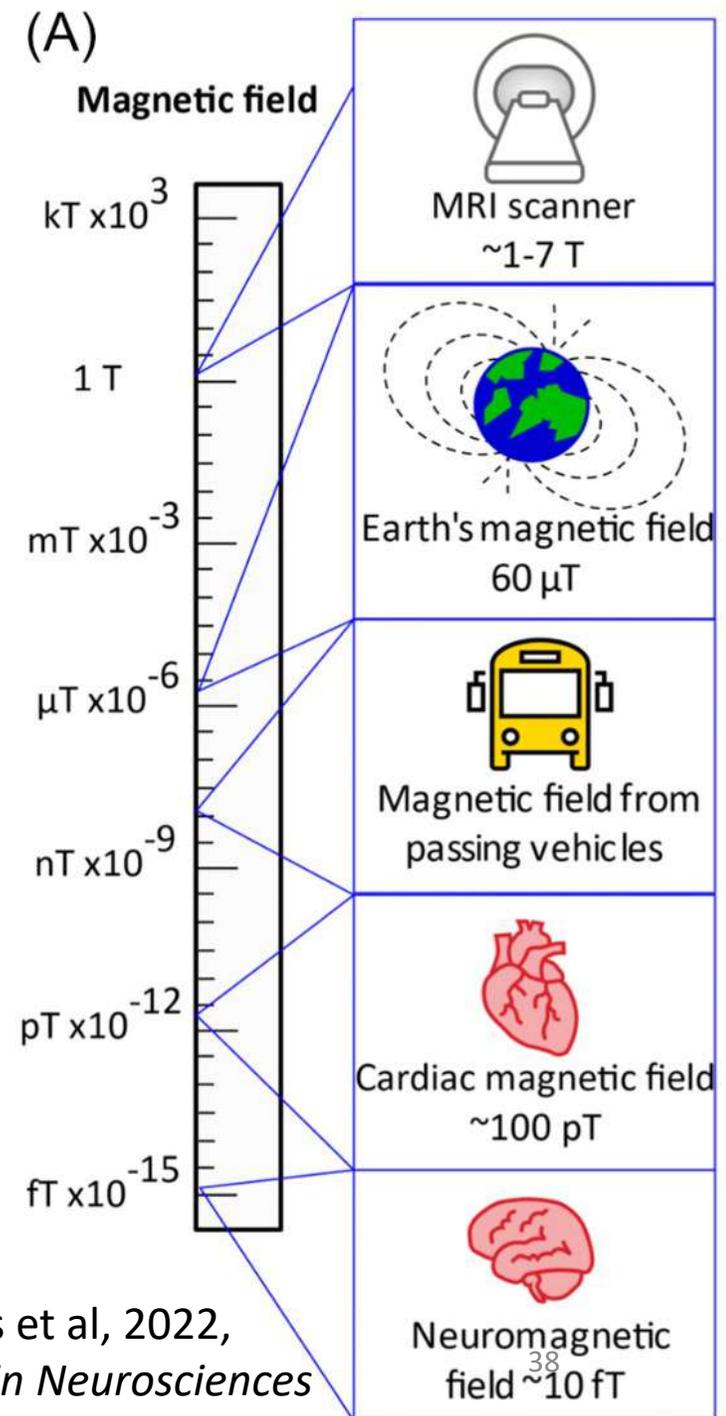
- La technique : La magnétoencéphalographie (MEG).

# Magnétoencéphalographie (MEG)

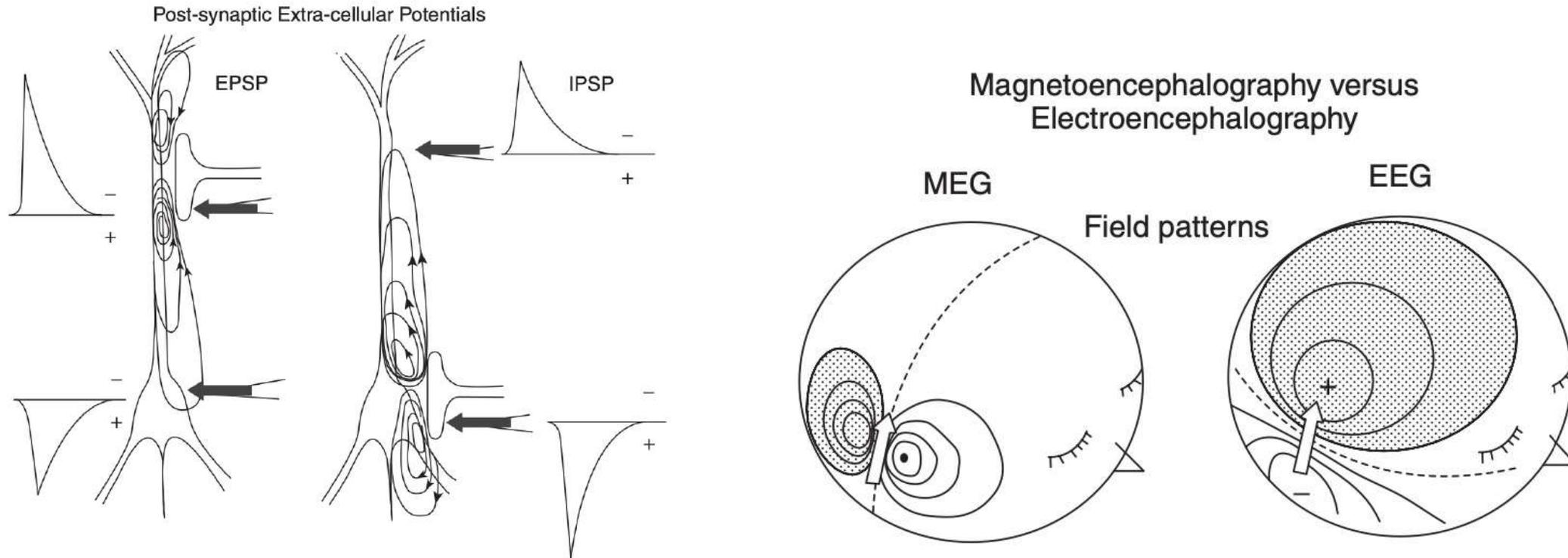
- Technique de neuro-imagerie fonctionnelle électrophysiologique non invasive.
- Il enregistre les champs magnétiques générés par les courants électriques qui se produisent dans le cerveau (très faible intensité  $10^{-15}$  T).



Singh, 2014, AIAN



# Magnétoencéphalographie (MEG)



Hansen et al, 2010. *MEG : An introduction to methods.*  
OUP.

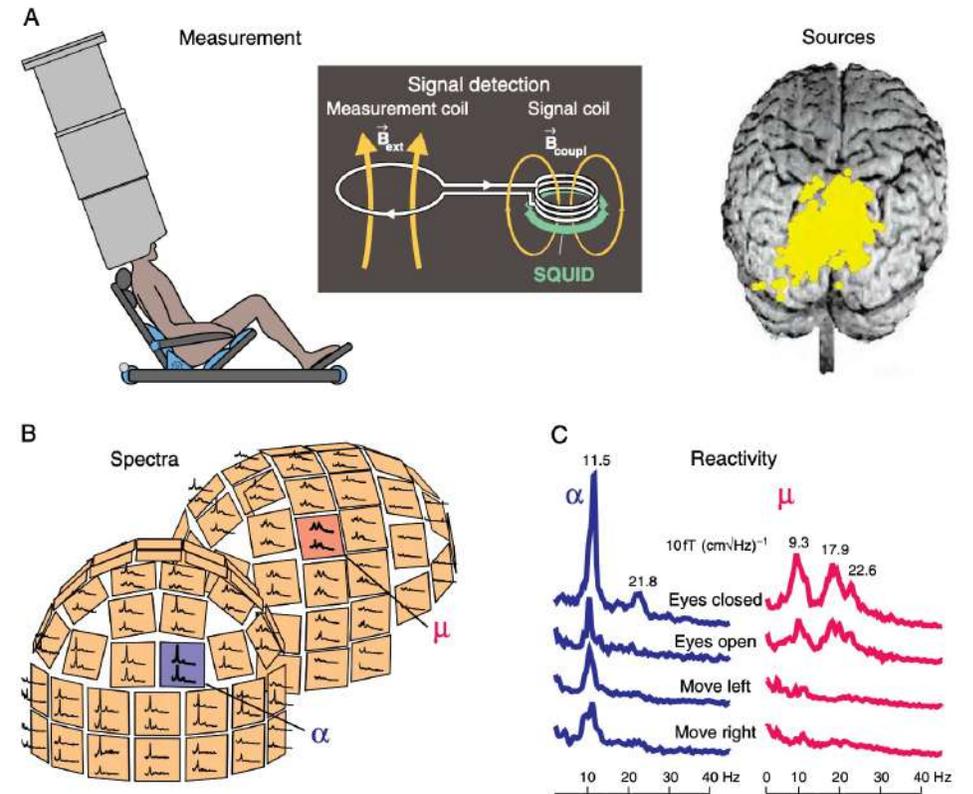
**Figure 1–4.** Field pattern of MEG, on the left, and EEG, on the right, caused by a current dipole model source in a concentric 4-layer spherical model of a head. The shaded areas indicate the magnetic flux out of the head (MEG) and the positive potential (EEG).  
(Adapted from Hari, in Niedermeyer & Lopes da Silva, 2005).

# Magnétoencéphalographie (MEG)

- Nombre de capteurs :  $\sim 200-300$ .
- Résolution spatiale :  $\sim 2-5$  mm.
- Résolution temporelle :  $\sim 10 \div \sim 1$  ms.
- Différence avec l'EEG :
  - Les champs magnétiques sont moins déformés par l'os et les autres tissus (meilleure résolution spatiale).
- Différence avec l'IRMf :
  - Une bien meilleure résolution temporelle.

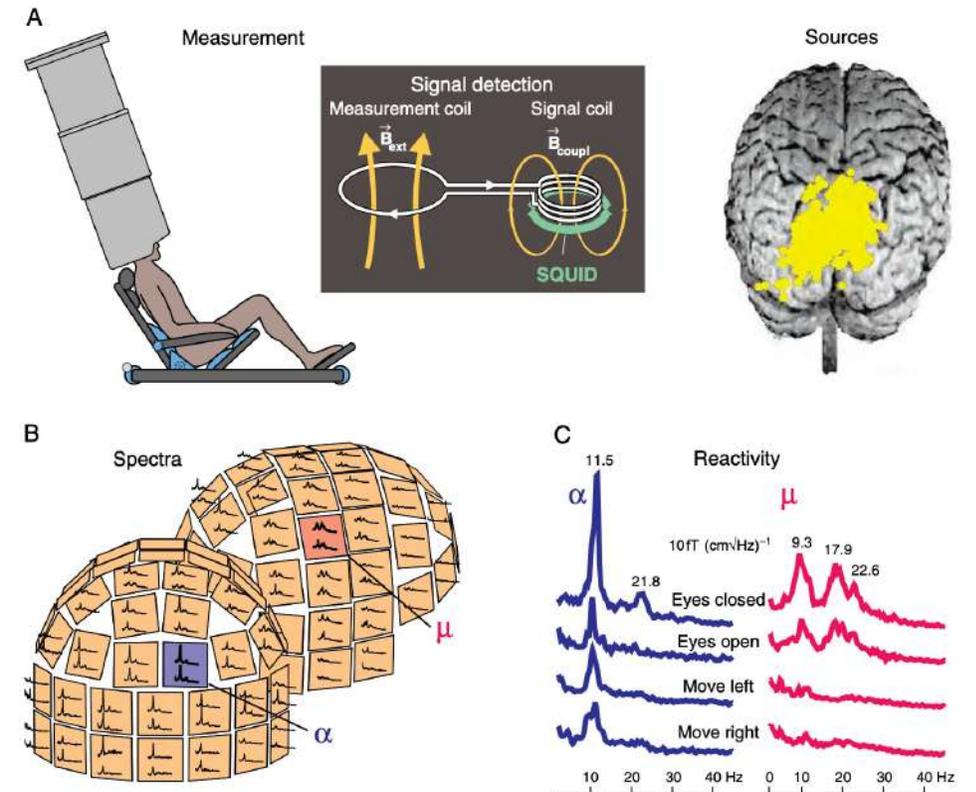
# Activité oscillatoire corticale

- **Les oscillations corticales** ou neurales sont des patterns rythmiques dans l'activité électromagnétique neuronale.
- Ce phénomène est décrit à la fois au niveau d'un neurone unique et au niveau de groupes de neurones.
- Dans ce deuxième cas, les techniques d'EEG et de MEG permettent de détecter les oscillations corticales.



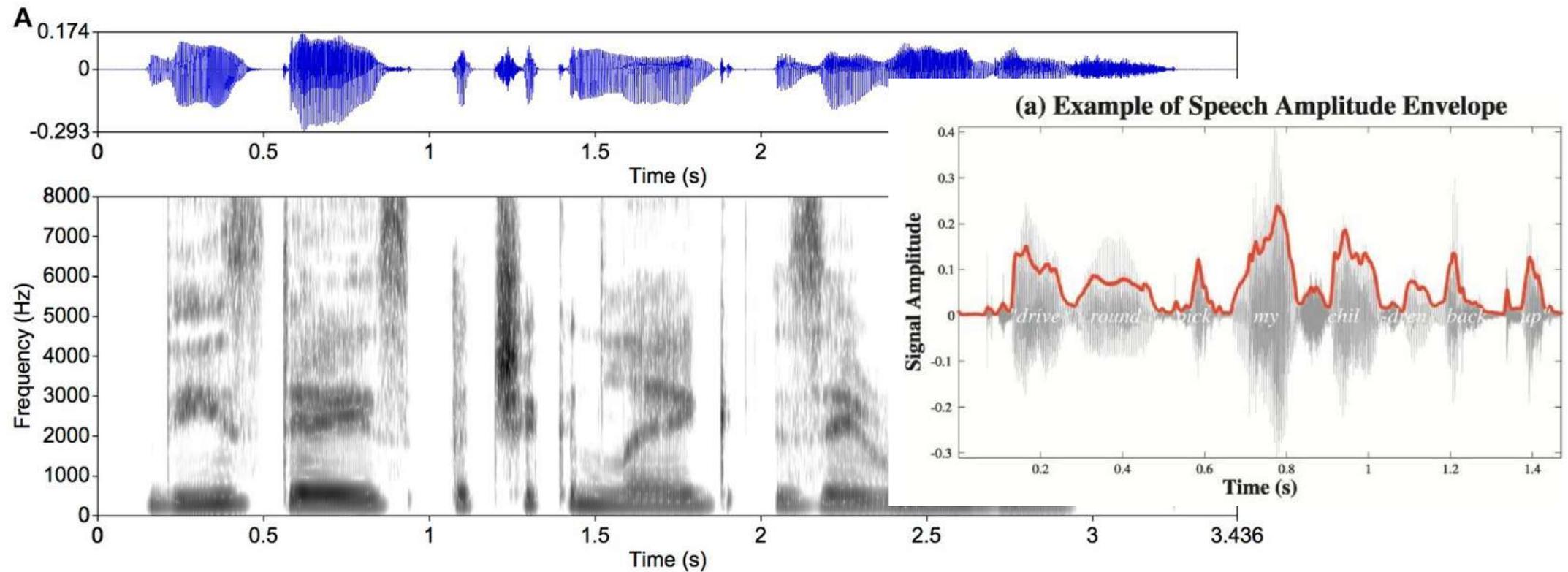
# Activité oscillatoire corticale

- Les oscillations corticales sont sensibles à différents types de stimuli et présentent un changement d'amplitude pour différentes fréquences.
- L'EEG et la MEG (avec une meilleure résolution spatiale) peuvent détecter et localiser cette réponse neuronale.



# Retour à Enveloppe de parole

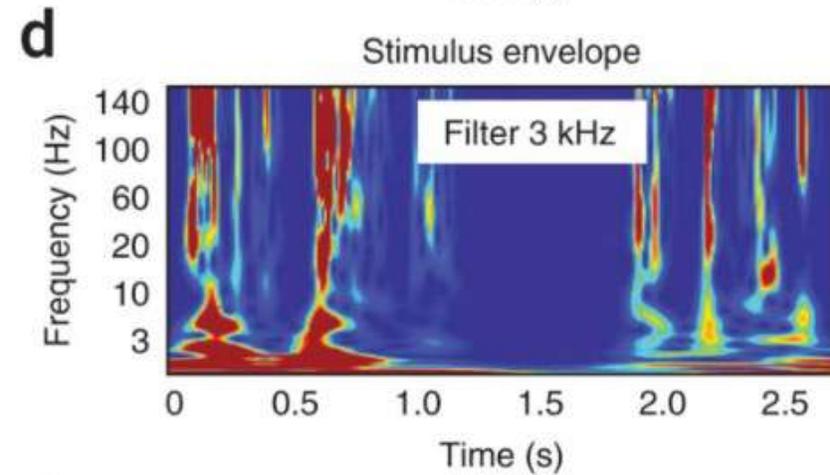
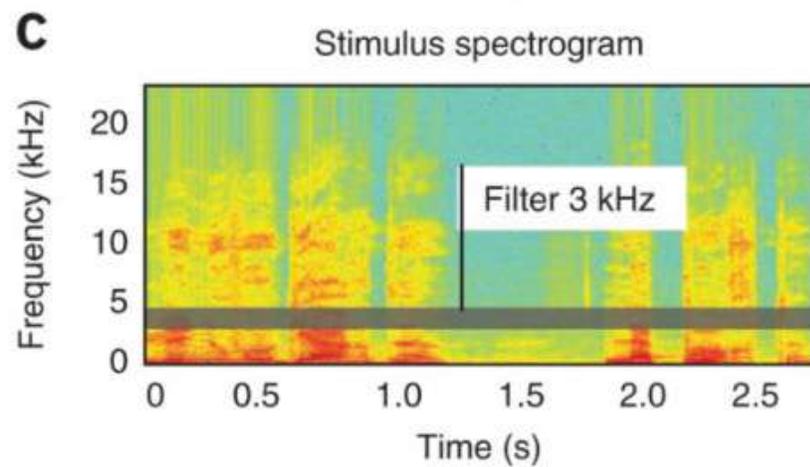
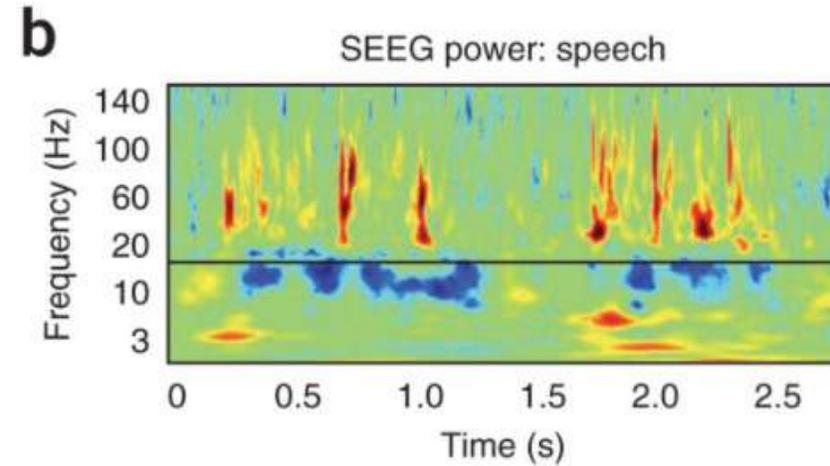
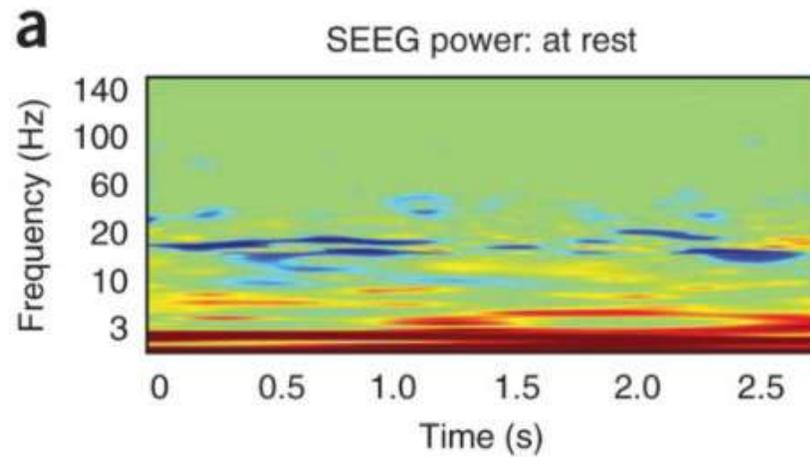
**Enveloppe de la parole** : fonction de l'amplitude du son dans le temps.



# Entraînement neuronal

- La fréquence de l'activité corticale s'aligne sur l'enveloppe de la parole.
- Ceci est particulièrement évident dans les bandes de fréquences thêta (3,5-7,5 Hz) et delta (0,5-3,0 Hz).
- Ce phénomène est documenté et étudié depuis plus de dix ans (Luo & Poeppel, 2007 ; Ding & Simon, 2012 ; 2013).
- Des phénomènes similaires ont été observés dans d'autres domaines de la perception.

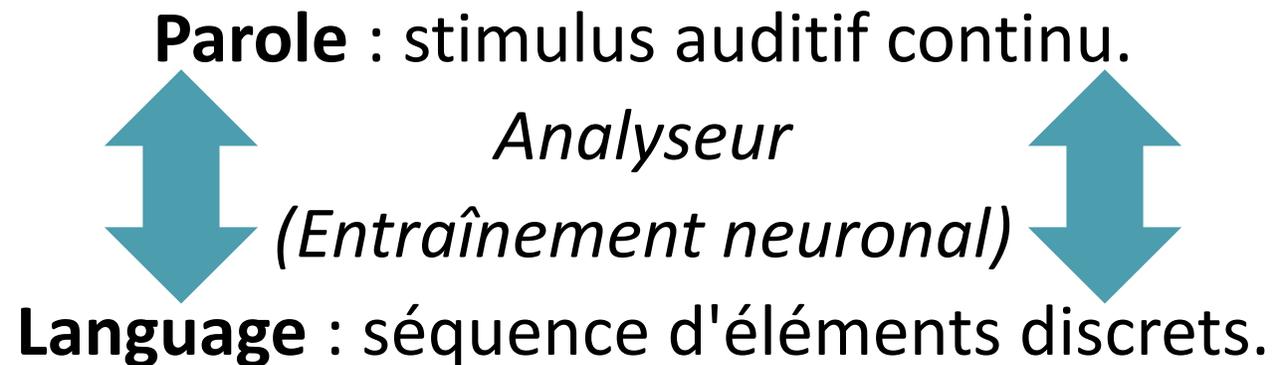
# Entraînement neuronal



# L'hypothèse

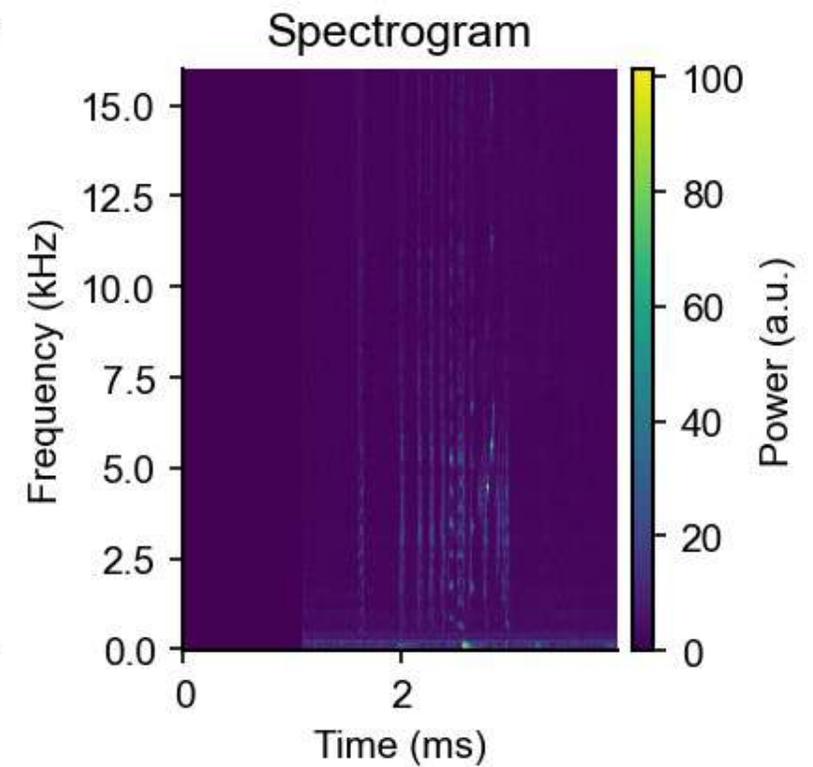
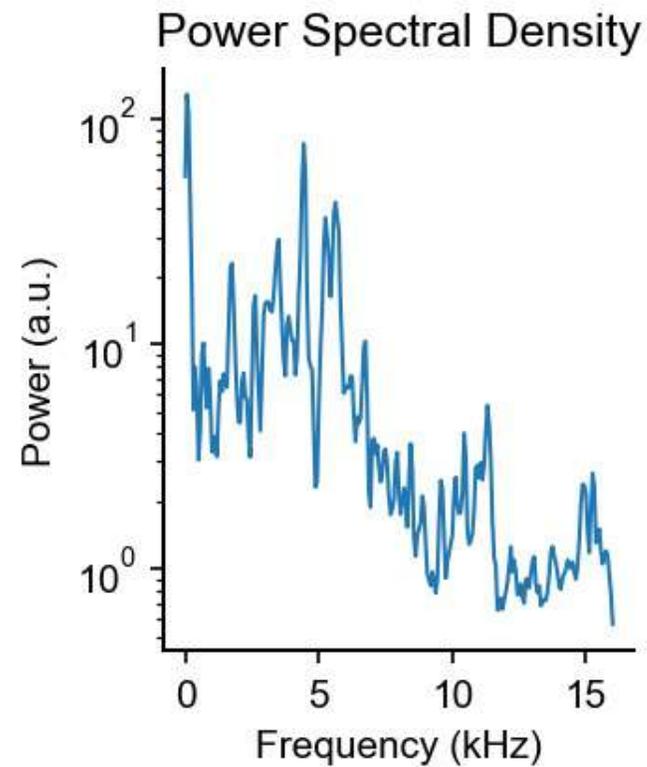
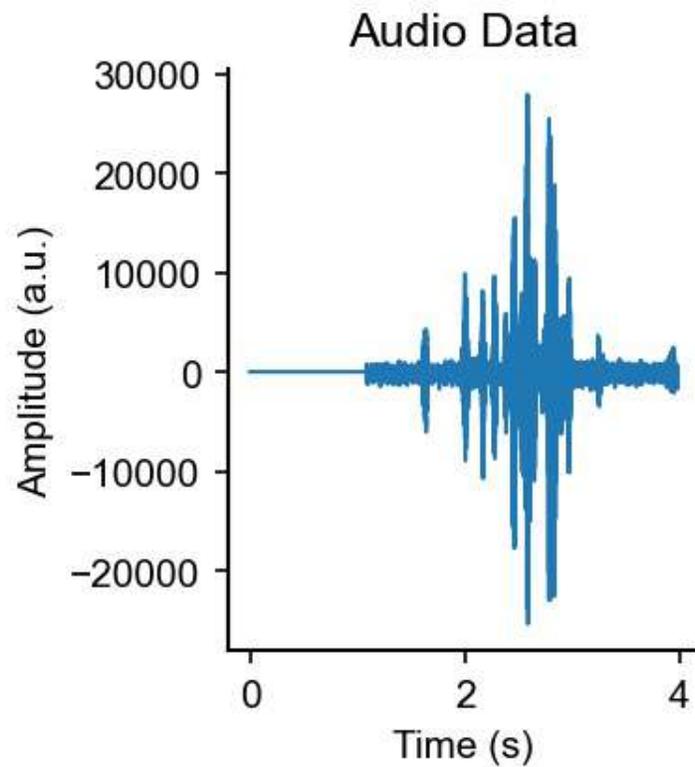
## Cortical oscillations and speech processing: emerging computational principles and operations

Anne-Lise Giraud<sup>1</sup> & David Poeppel<sup>2</sup> **NATURE NEUROSCIENCE** VOLUME 15 | NUMBER 4 | APRIL 2012



L'interaction entre l'enveloppe de la parole et les oscillations rythmiques du cerveau (entraînement neuronal) permet la **segmentation**.

# La transformation de Fourier



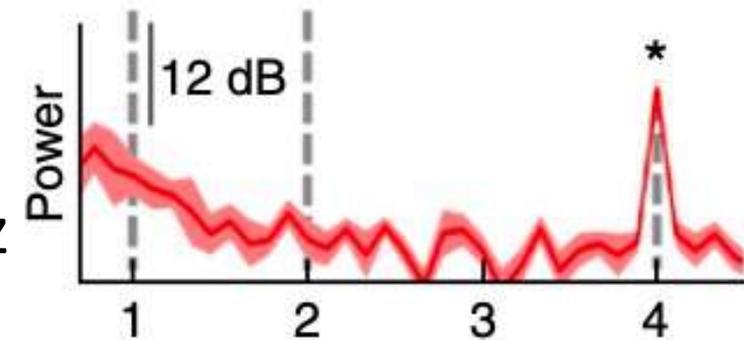
La mise en œuvre

# Cortical tracking of hierarchical linguistic structures in connected speech

VOLUME 19 | NUMBER 1 | JANUARY 2016 NATURE NEUROSCIENCE

Nai Ding<sup>1,2</sup>, Lucia Melloni<sup>3-5</sup>, Hang Zhang<sup>1,6-8</sup>, Xing Tian<sup>1,9,10</sup> & David Poeppel<sup>1,11</sup>

- Des études antérieures ont montré que l'enveloppe du signal MEG dans l'entraînement neuronal présente des pics.
- Un pic saillant et généralisé se situe autour de 4 Hz (~250ms).
- Cela correspond à la durée moyenne d'une syllabe d'une langue à l'autre.

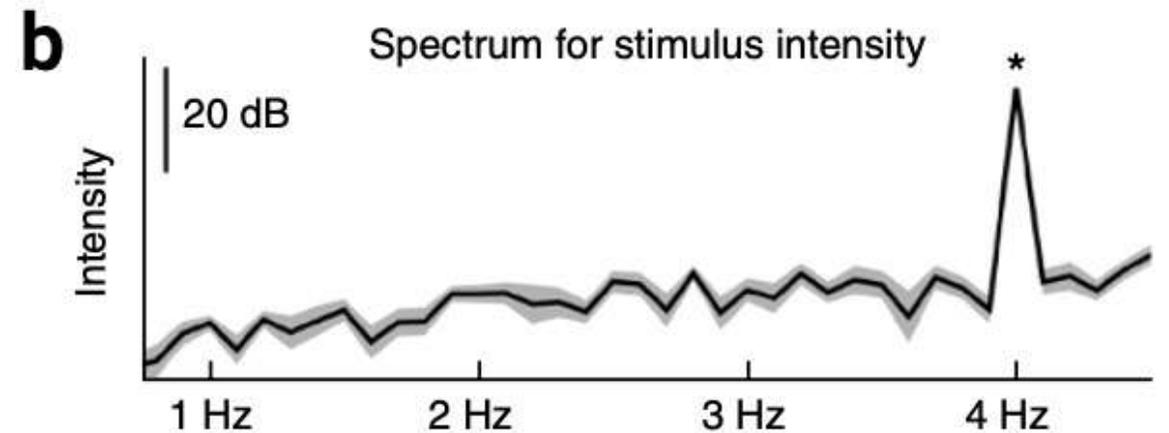
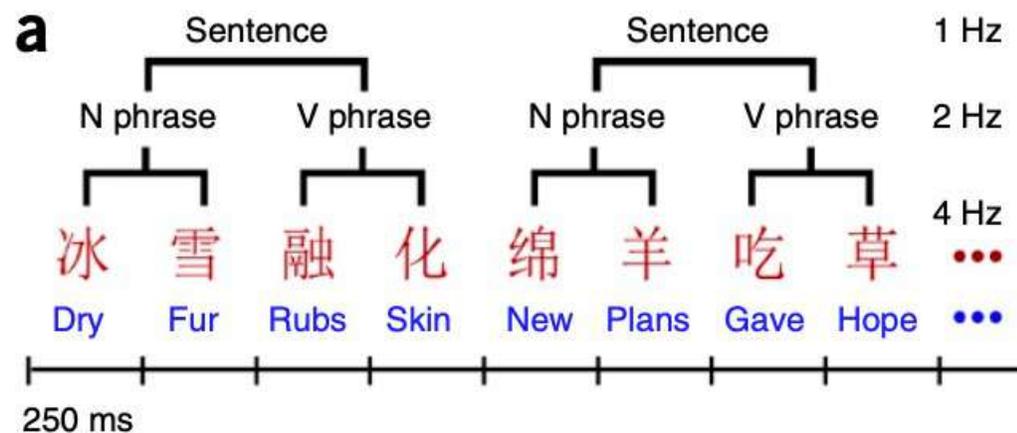


# La mise en œuvre

- Comment pouvons-nous passer de la détection (segmentation) des syllabes à des structures linguistiques plus élevées ?
  - *Une idée ?*

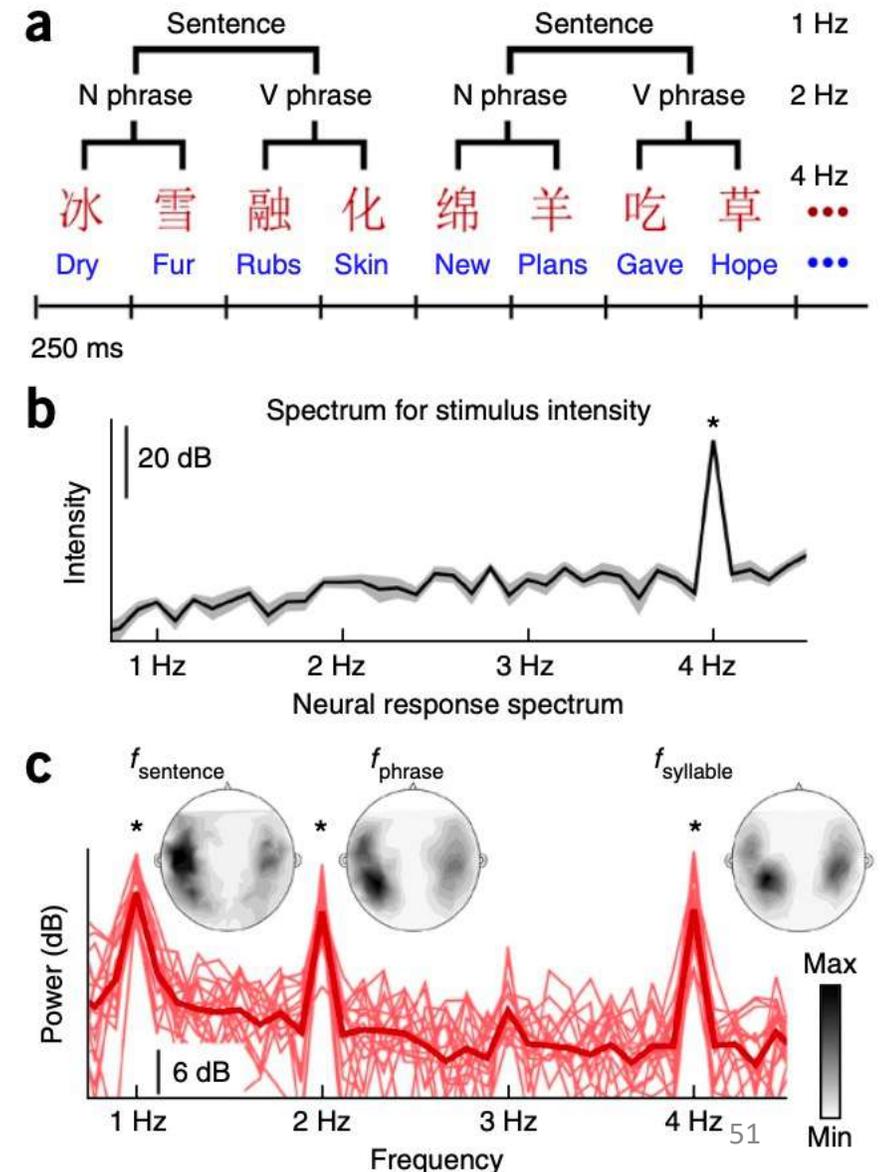
# Expérience I

- 34 participants chinois natifs - MEG pour l'activité corticale.
- Stimulus linguistique hiérarchique avec des syllabes synthétisées indépendamment (50 phrases de quatre syllabes).
- Pas de repère prosodique pour le niveau du syntagme ou de la phrase.



# Expérience I - Résultats

- L'activité corticale présente des pics à 4 Hz (comme prévu) mais aussi à 2 Hz (fréquence du syntagme) et à 1 Hz (fréquence de la phrase).
- Le stimulus auditif ne présente pas de tels pics.
- La détection de syntagmes et de phrases ne peut être déduite de la nature physique du stimulus.
- Le signal MEG montre l'activation de niveaux abstraits de traitement correspondant à les connaissances linguistiques.



# Des questions ?

**Expérience II** : ce résultat peut-il encore être dérivé des propriétés physiques du stimulus auditif (par exemple, les sous-harmoniques) ?

**Expérience III** : est-ce valable d'un point de vue interlinguistique ?

**Expérience IV** : Pourquoi avons-nous besoin de connaissances linguistiques abstraites ? Peut-être s'agit-il simplement d'un apprentissage statistique !

**Expérience V** : Que se passe-t-il au niveau des populations neuronales ?

# Expérience II

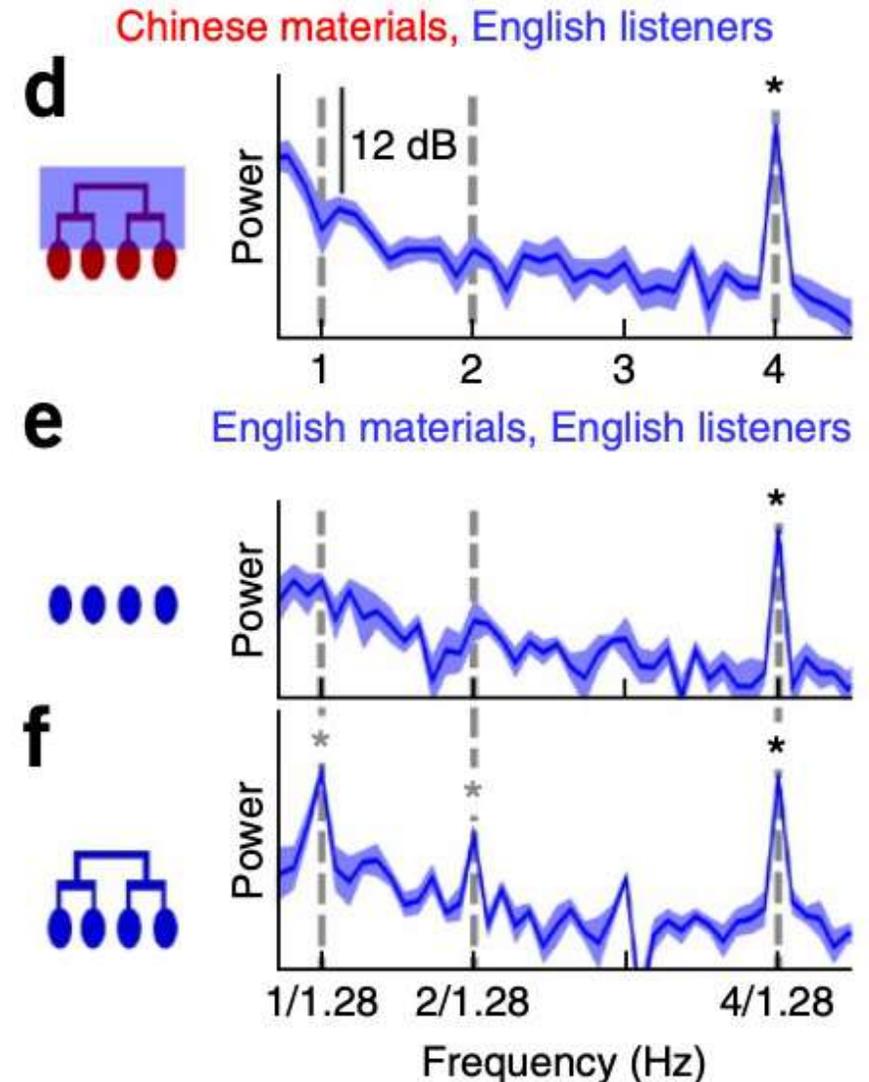
*Ce résultat peut-il encore être dérivé des propriétés physiques du stimulus auditif (par exemple, les sous-harmoniques) ?*

- Non !
- Si nous fournissons un stimulus équivalent avec une série de mots qui ne forment pas de syntagmes ou de phrases:
  - Les propriétés physiques du stimulus auditif sont les mêmes.
  - Le signal MEG ne culmine qu'à 4 Hz (mots monosyllabiques).

# Expérience III

*Cela est-il valable d'un point de vue interlinguistique ?*

- Oui !
- Avec 13 locuteurs natifs anglais, les résultats sont reproduits avec un stimulus équivalent en anglais.
- Il est intéressant de noter que les anglophones sont sensibles à la rythmicité syllabique du stimulus chinois (propriété physique), mais qu'ils ne montrent aucune activation pour le niveau supérieur de l'analyse linguistique.



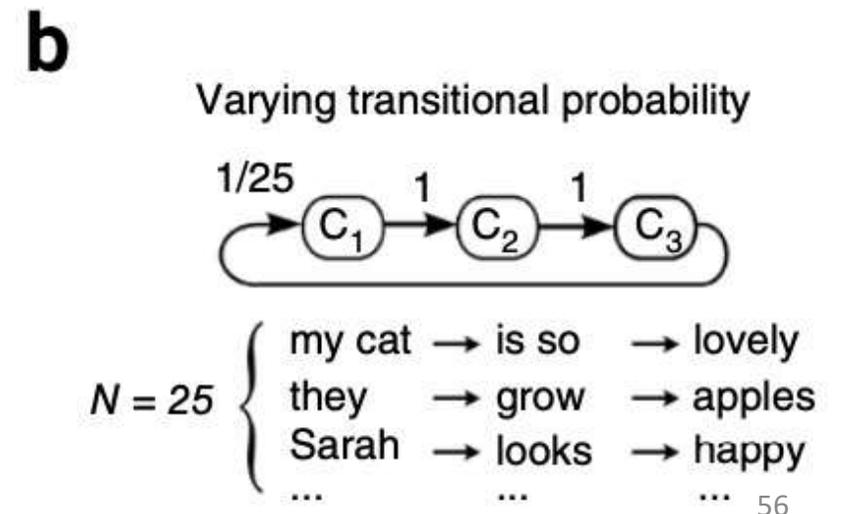
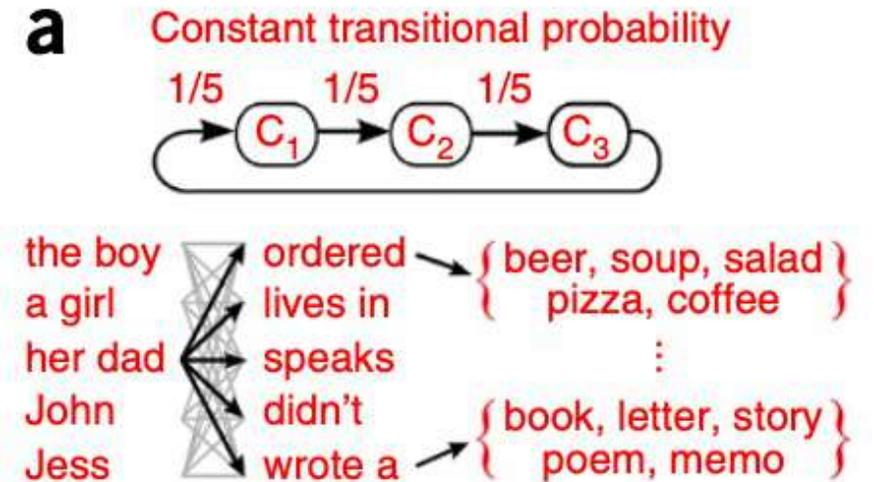
# Expérience IV

*Pourquoi avons-nous besoin de connaissances linguistiques abstraites ?  
Peut-être s'agit-il simplement d'un apprentissage statistique !*

- Une hypothèse différente pour le traitement des langues :
  - La compréhension des phrases est basée sur notre capacité à suivre la prévisibilité des nouveaux éléments de la phrase en fonction des éléments précédents.
- Une formalisation possible de cette capacité de prédiction est la probabilité de transition, c'est-à-dire la probabilité qu'un élément apparaisse après un ensemble d'éléments précédents dans une langue.
- Selon cette approche, les résultats de l'expérience principale peuvent refléter la réponse neuronale à la probabilité de transition dans la séquence de stimuli.

# Expérience IV

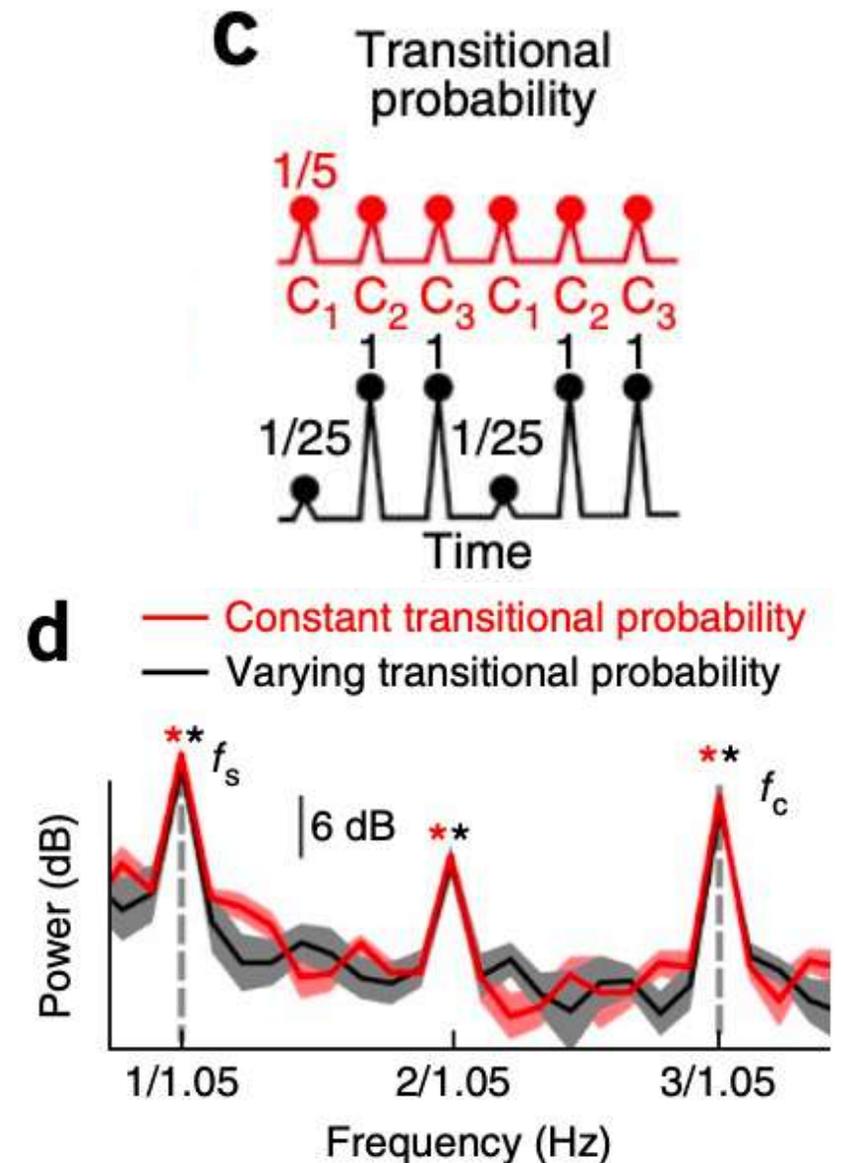
- Deux séries de stimuli dans lesquels la probabilité de transition est contrôlée.
- Dans les deux cas, chaque phrase est composée de trois éléments (SVO).
  - a) 5 S peuvent sélectionner de manière égale chacun des 5 V. Chaque V peut choisir de manière égale 1/5 O différents possibles. La probabilité de transition est toujours de 1/5.
  - b) 25 phrases différentes avec une séquence fixe de S, V et O.



# Expérience IV

## *Structures linguistiques ou apprentissage statistique ?*

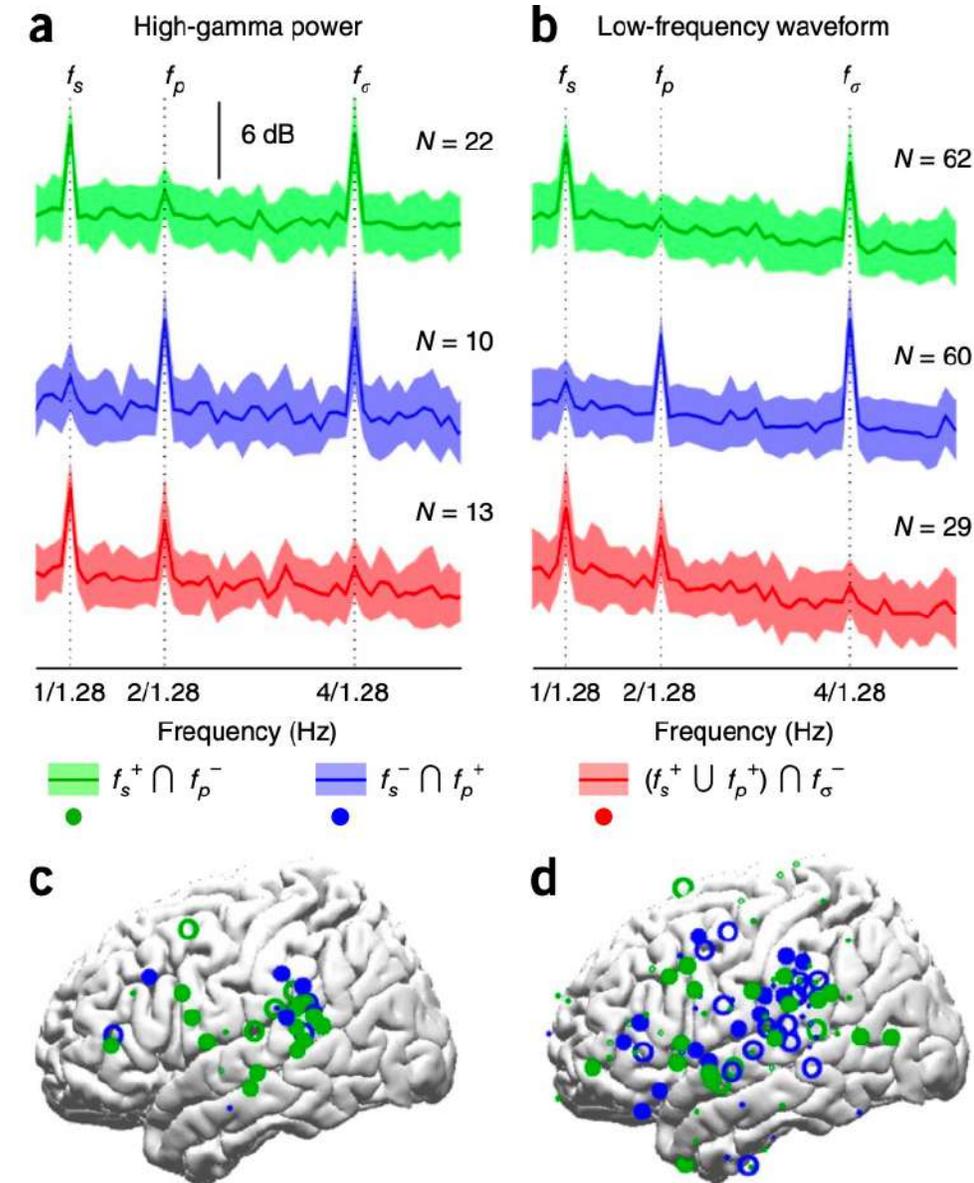
- Le signal MEG (d) ne permet pas de différencier les deux types de probabilité transitoire.
- Le suivi neuronal reflète les propriétés structurelles des phrases et n'est pas perturbé par la probabilité de transition (il ne s'agit donc pas d'un apprentissage statistique).



# Expérience V

Que se passe-t-il au niveau des populations neuronales ?

- **ECoG**: 5 personnes avec épilepsie.
- Les réponses neuronales pour les syntagmes et pour les phrases sont dissociables.
- Les groupes de neurones ayant des réponses sélectives pour le niveau du syntagme ou du phrase présentent une distribution spatiale différente :
  - *Syntagmes* : pSTG bilatéral.
  - *Phrases* : pSTG et mSTG bilatéralement + IFG gauche.



# Résumé

- L'activité corticale suit la segmentation de la parole connectée en structures linguistiques hiérarchiques (des syllabes aux phrases en passant par les syntagmes).
- La base neurophysiologique de ce processus est la segmentation des syllabes via l'entraînement neuronal : l'alignement entre l'enveloppe de la parole et l'activité oscillatoire corticale.
- Ce processus (passage des syllabes à des structures plus complexes) est valable d'une langue à l'autre et peut être justifié soit par les propriétés acoustiques de la parole, soit par la probabilité de transition entre les éléments linguistiques.
- L'activité corticale spécifique aux différents niveaux de représentation abstraite (expressions et phrases) est localisée dans des régions cérébrales distinctes.

# Conclusion

Comme pour l'étude précédente, cette série d'expériences met en évidence un **processus neurophysiologique** qui peut *expliquer* notre capacité à extraire des propriétés acoustiques de la parole des unités abstraites de représentation linguistique et à les combiner dans des niveaux hiérarchiques de structures linguistiques.

L'expérience ECoG montre comment ces différents niveaux de complexité structurelle sont représentés dans des zones distinctes du cortex qui sont les **épices** du réseau cérébral impliqué dans ce processus.