

L'imagerie cérébrale en psychologie cognitive

Stanislas Dehaene
Chaire de Psychologie Cognitive Expérimentale

Troisième Cours

Mesure du décours temporel des
opérations cognitives

Pourquoi la psychologie cognitive s'intéresse-t'elle au temps de traitement de l'information?

Le temps de traitement fournit des indications essentielles sur l'architecture cognitive et sur les algorithmes utilisés par le cerveau humain.

L'analyse du déroulement temporel des opérations cognitives soulève des questions fondamentales:

- Une tâche cognitive peut-elle se décomposer en étapes élémentaires?
- Combien de temps prend chaque étape?
- Comment ce temps varie-t-il en fonction des paramètres de la tâche?
- L'ordre d'exécution des étapes peut-il varier?
- Le traitement des informations est-il parallèle ou sériel? Continu ou discret?
- Pourquoi le temps de traitement est-il variable d'essai en essai? Selon les individus?

Inférences fondées sur la chronométrie mentale

- Franciscus Donders (1868):

Première mesure de la vitesse des opérations mentales

(temps de réaction simple, avec discrimination, ou avec choix)

- Saul Sternberg:

La recherche sérielle en mémoire (1966)

La méthode des facteurs additifs (1969)

- Roger Shepard:

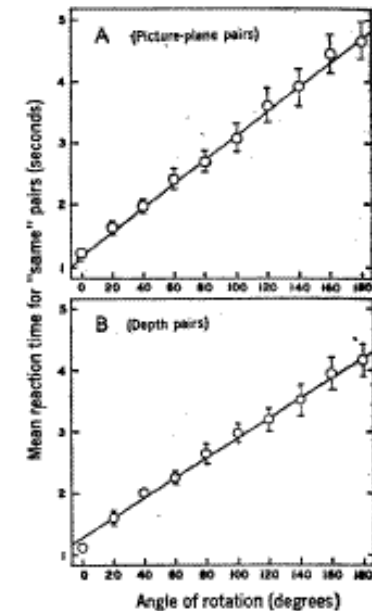
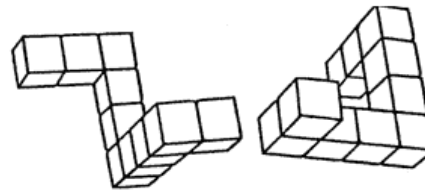
Rotation mentale (1971-1973)

- Michael Posner:

« Chronometric explorations of mind » (1978):

Etapes de traitement des lettres

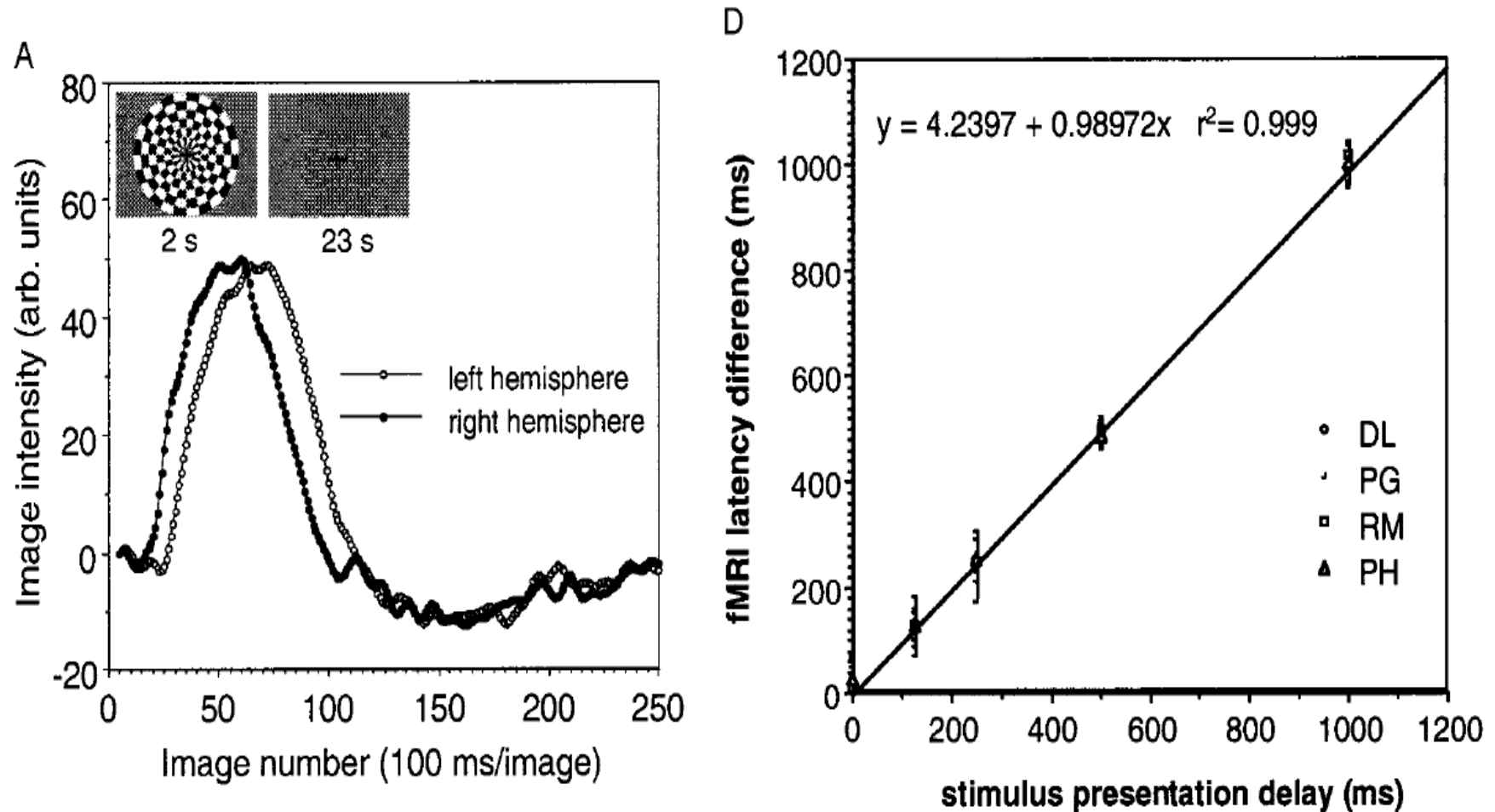
Vitesse d'orientation de l'attention visuelle



I. Décomposition temporelle fondée sur l'IRM fonctionnelle

- La réponse hémodynamique mesurée par le signal BOLD est différée de plusieurs secondes par rapport à l'activité neuronale
- Cependant, dans la mesure où ce délai est relativement fixe, il est possible d'inférer certains aspects du déroulement temporel de l'activité cérébrale à partir des signaux d'IRM fonctionnelle.

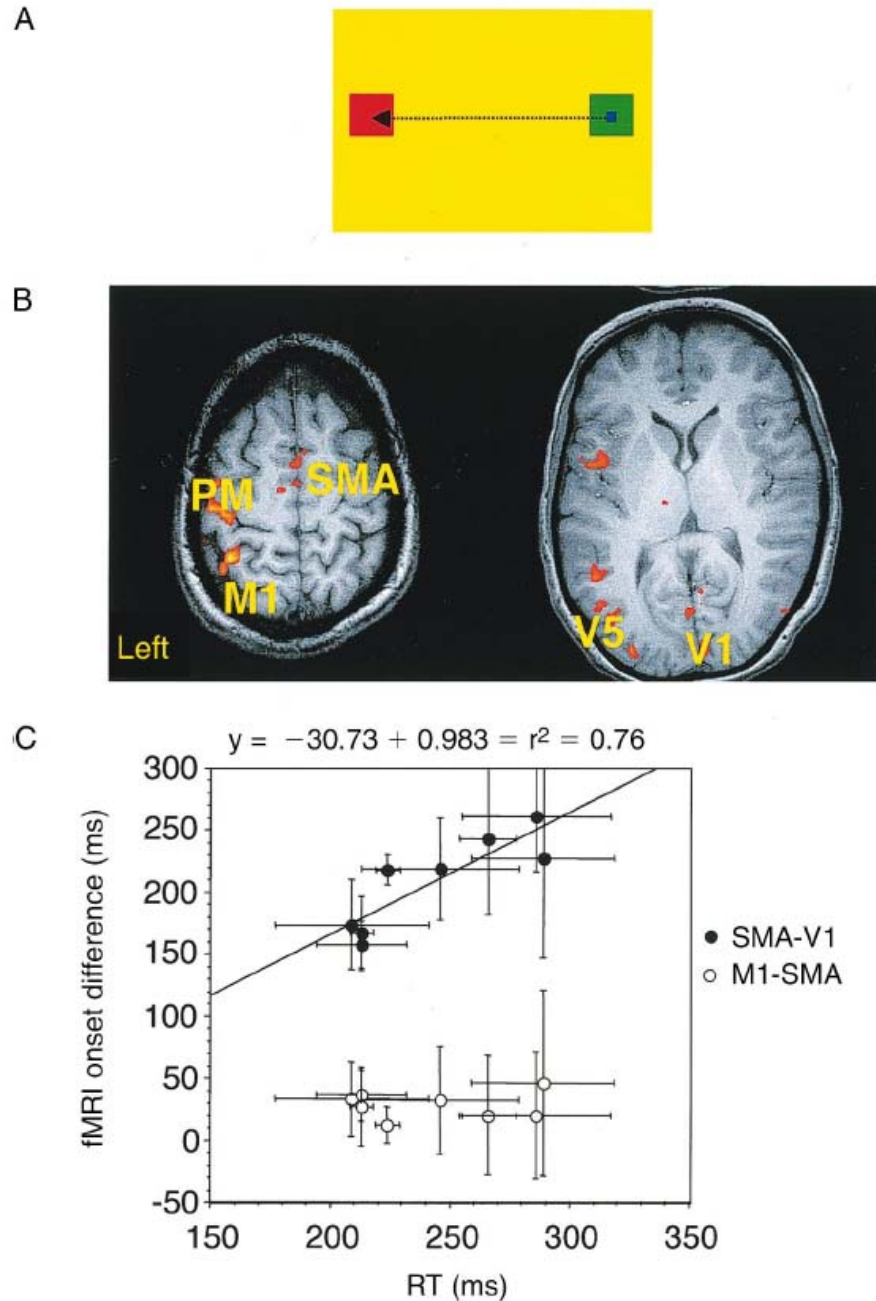
L'IRMf peut détecter des délais de quelques centaines de millisecondes dans l'entrée en activité de deux régions cérébrales



- Damier flashé pendant 2 secondes, à gauche et à droite du point de fixation
- Avec un décalage temporel de 120, 250, 500 ou 1000 millisecondes
- Ce délai se retrouve dans la réponse BOLD mesurée en IRMf

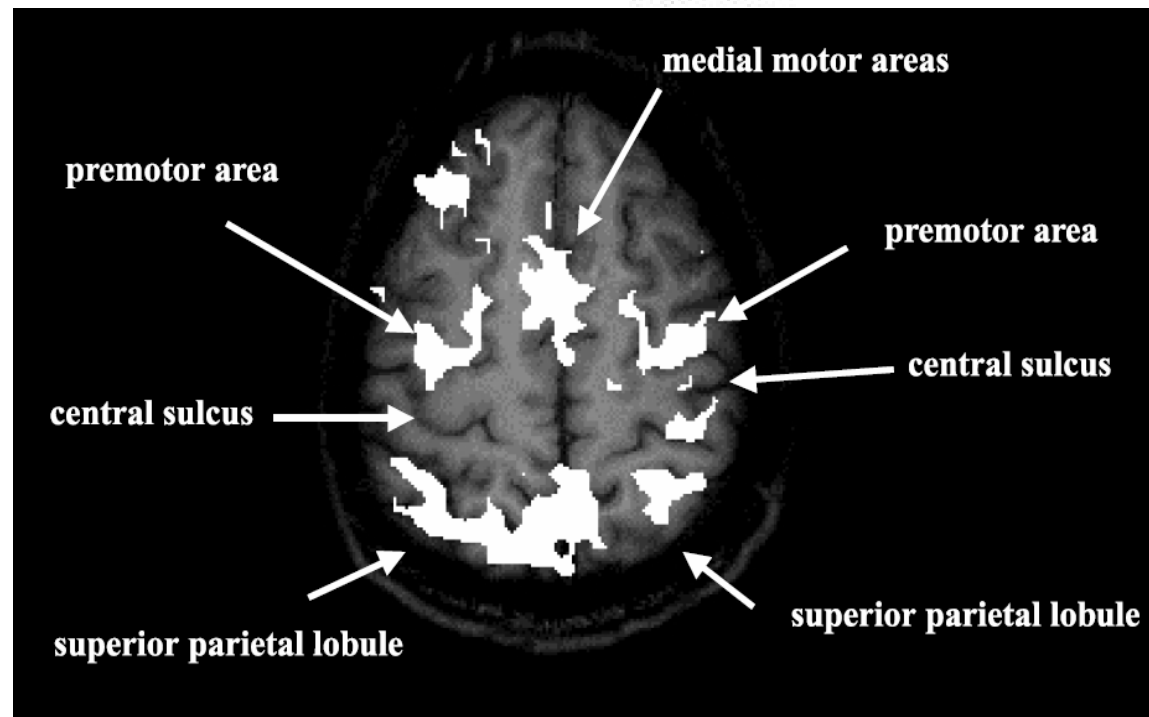
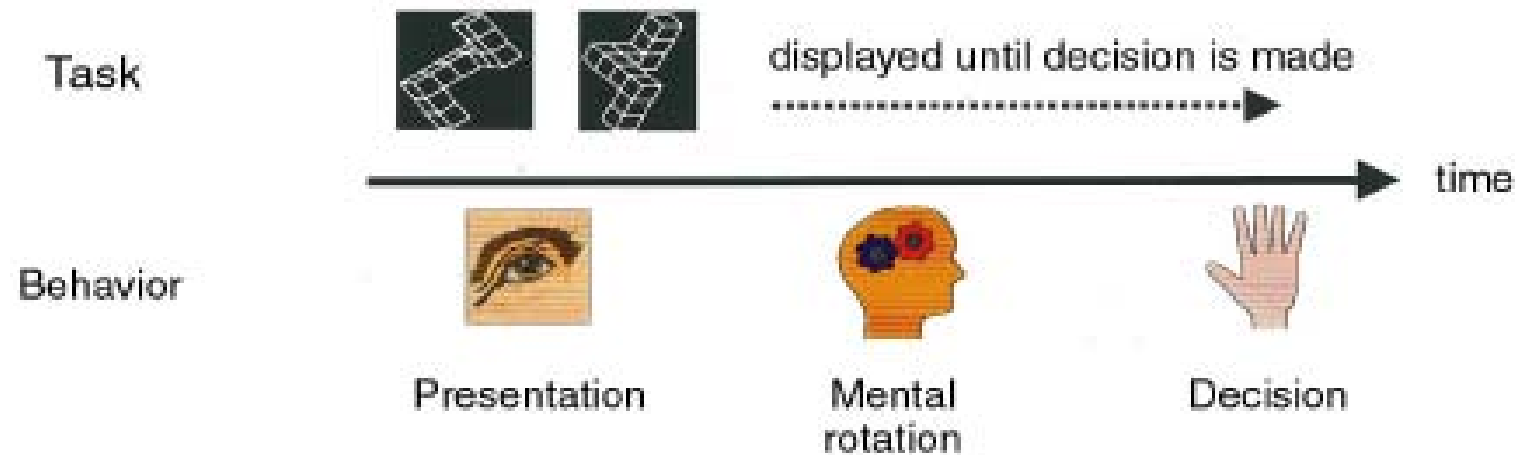
L'IRM peut détecter des décalages temporels *relatifs* de quelques dizaines de millisecondes

- Tâche de mouvement de la main vers une cible
- Le temps de réaction varie d'un sujet à l'autre
- Le décalage temporel des réponses BOLD entre le cortex visuel primaire (V1) et l'aire motrice supplémentaire (SMA) corrèle avec une pente de 1 avec le temps de réaction des sujets
- Le décalage entre l'aire motrice supplémentaire et l'aire motrice primaire, lui, ne varie pas



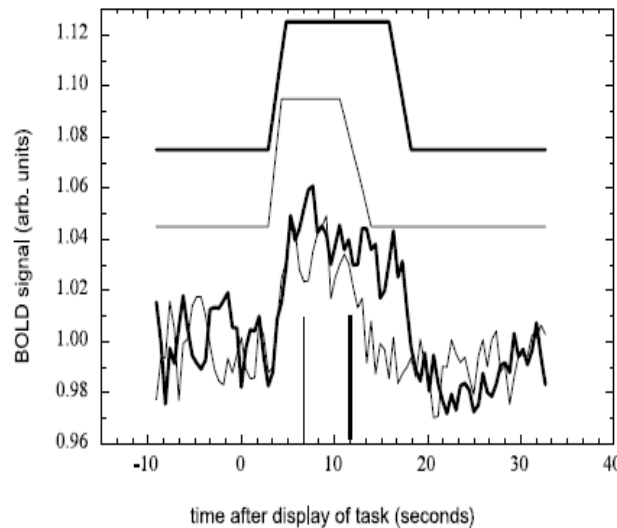
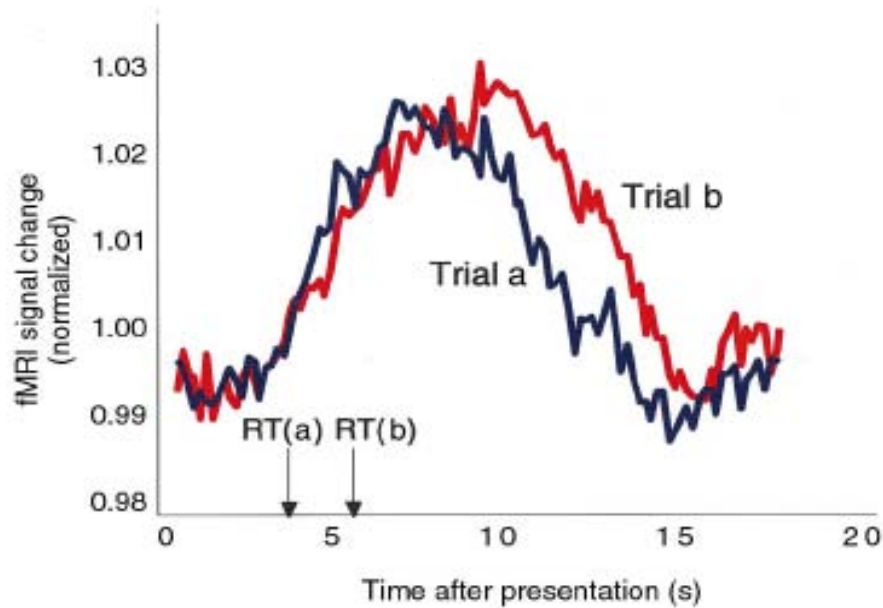
Menon, R. S., Luknowsky, D. C., & Gati, J. S. (1998). Mental chronometry using latency-resolved functional MRI. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 95(18), 10902-10907.

Exemple 1: Dissection de la tâche de rotation mentale par IRMf

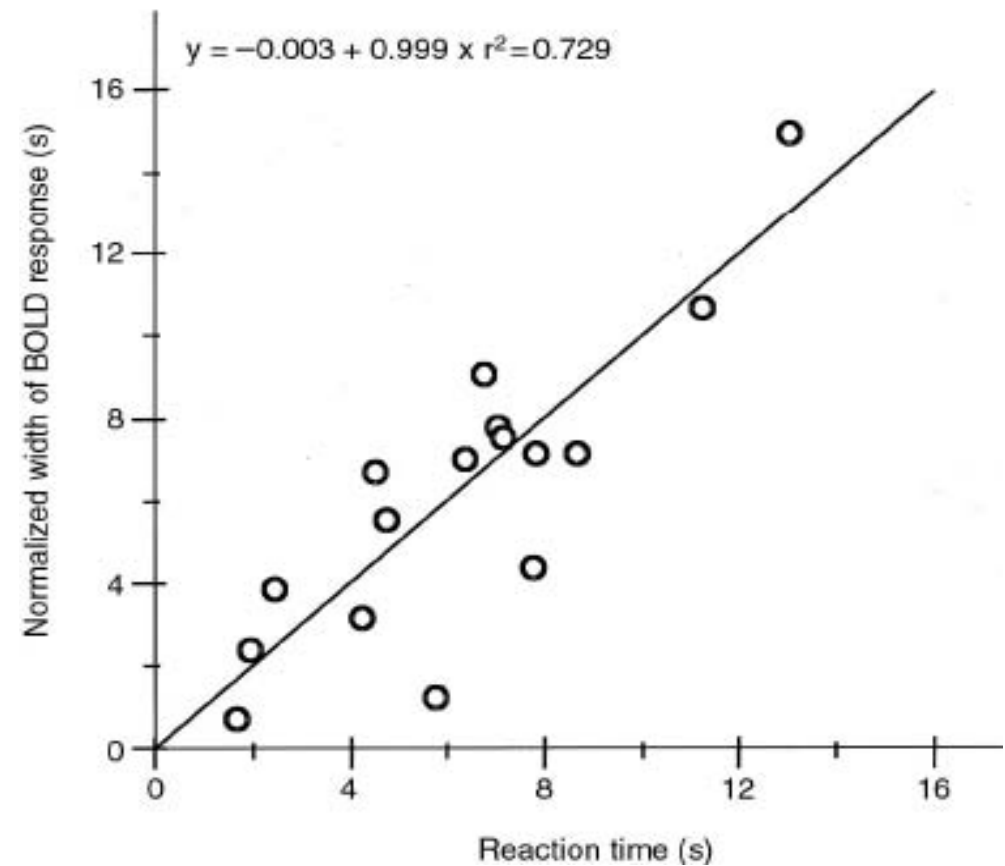


Richter, W., Somorjai, R., Summers, R., Jarmasz, M., Menon, R. S., Gati, J. S., et al. (2000). Motor area activity during mental rotation studied by time-resolved single-trial fMRI. *J Cogn Neurosci*, 12(2), 310-320.

Détection du temps de rotation mentale par IRMf



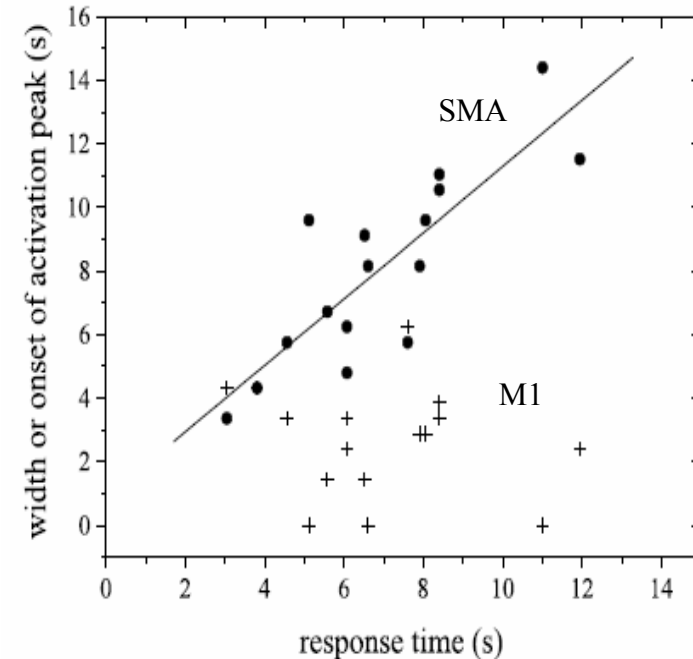
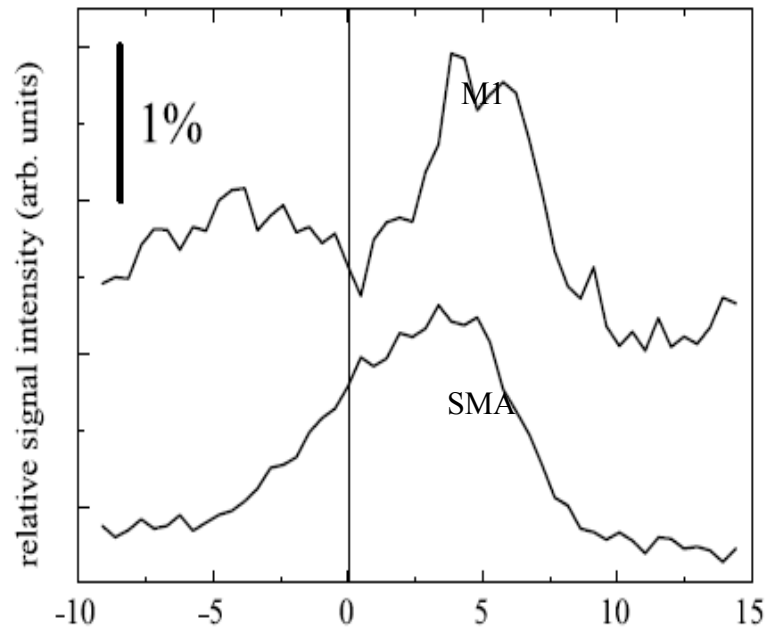
Corrélation entre la durée de la réponse BOLD et le temps de réponse



Richter, W., Somorjai, R., Summers, R., Jarmasz, M., Menon, R. S., Gati, J. S., et al. (2000). Motor area activity during mental rotation studied by time-resolved single-trial fMRI. *J Cogn Neurosci*, 12(2), 310-320.

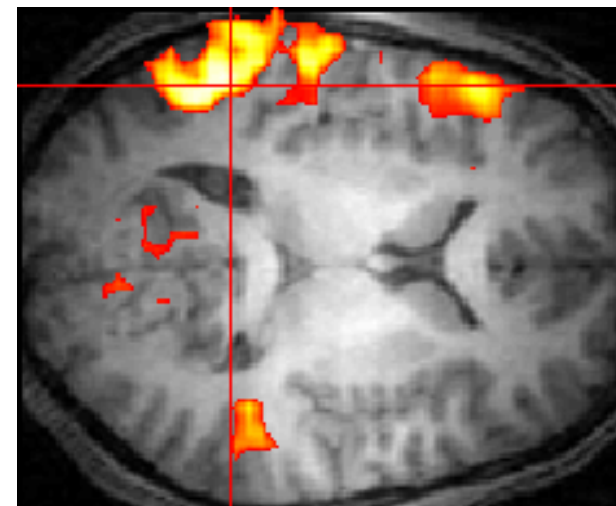
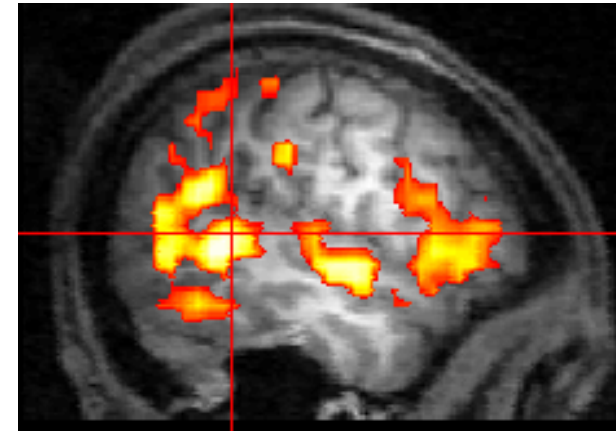
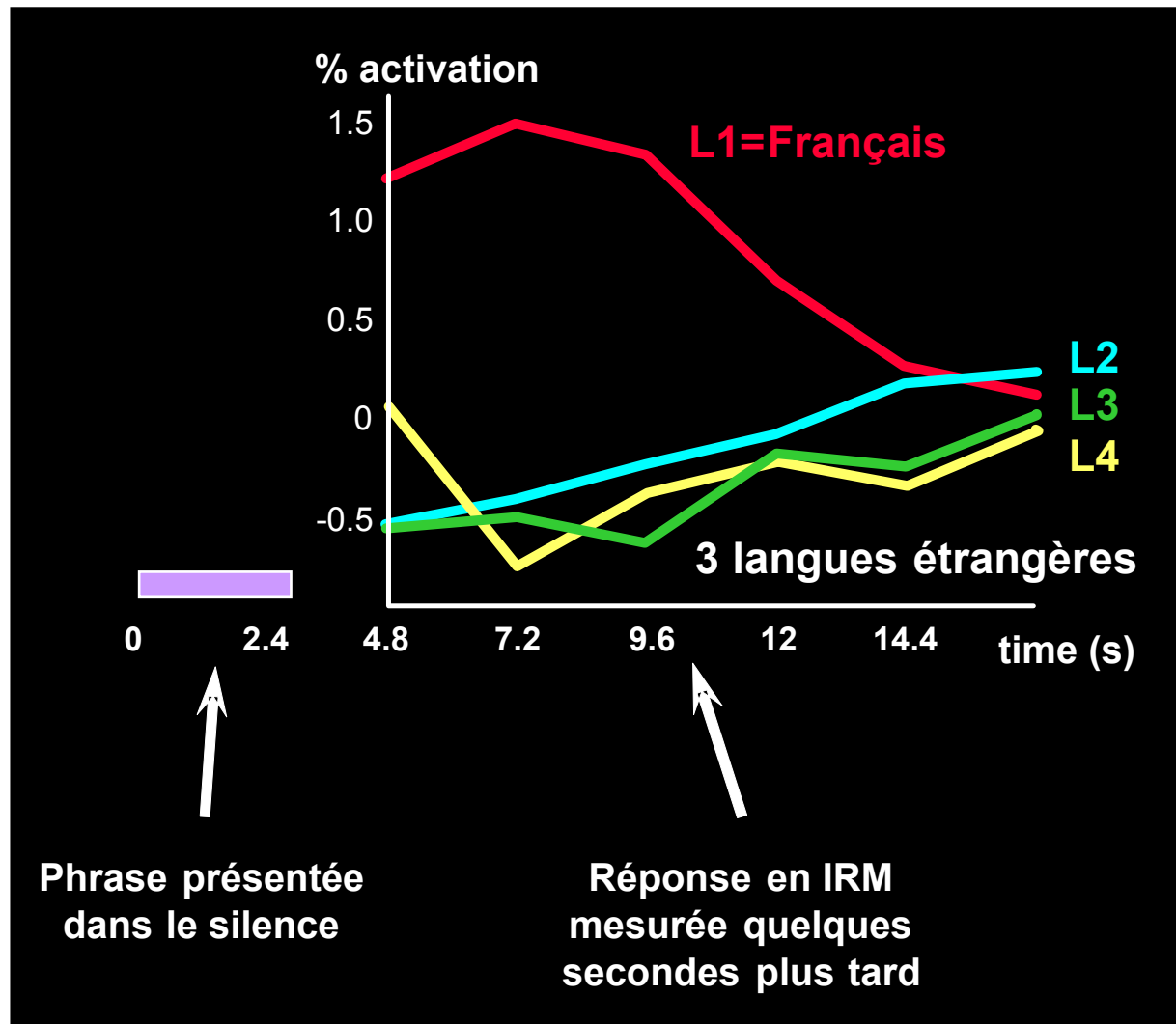
Distinction entre **deux types de régions** sur la base de leurs réponses temporelles

- Région M1 = durée fixe, démarrage prédit par le temps de réaction
- Région SMA = démarrage fixe, durée prédite par le temps de réaction



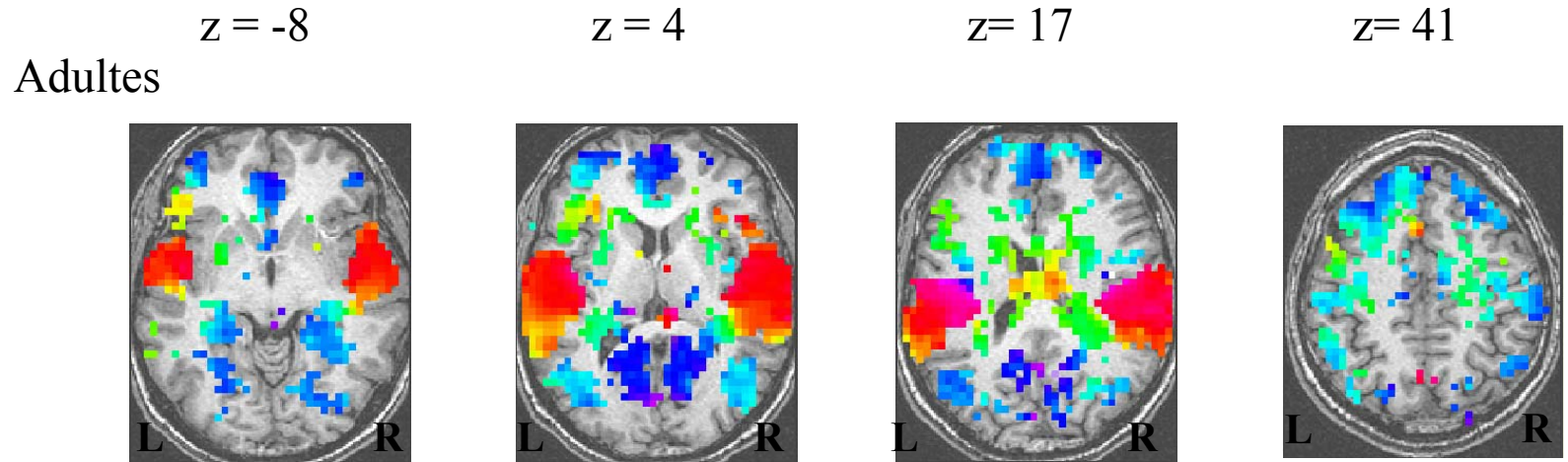
	<i>Onset</i>			<i>Width</i>		
	<i>Slope</i>	<i>Intercept (sec)</i>	<i>p value</i>	<i>Slope</i>	<i>Intercept (sec)</i>	<i>p value</i>
Left M1	0.61	1.7	0.0002	0.10	5.40	>0.1
Left SPL	-0.03	3.1	>0.1	0.65	5.0	2×10^{-6}
Left premotor	-0.05	2.5	>0.1	0.96	2.2	$< 10^{-12}$
SMA	-0.04	2.6	>0.1	0.88	3.1	1×10^{-6}
Right M1	-0.28	10.5	>0.1	-0.07	5.8	>0.1
Right SPL	-0.05	3.2	>0.1	0.79	4.4	1×10^{-5}
Right premotor	-0.09	3.5	>0.1	0.92	3.0	3×10^{-6}

Exemple 2: L'examen des délais d'activation fournit des indications sur l'architecture du système linguistique.

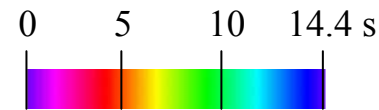


Pallier, C., Dehaene, S., Poline, J. B., LeBihan, D., Argenti, A. M., Dupoux, E., et al. (2003). Brain imaging of language plasticity in adopted adults: can a second language replace the first? *Cereb Cortex*, 13(2), 155-161.

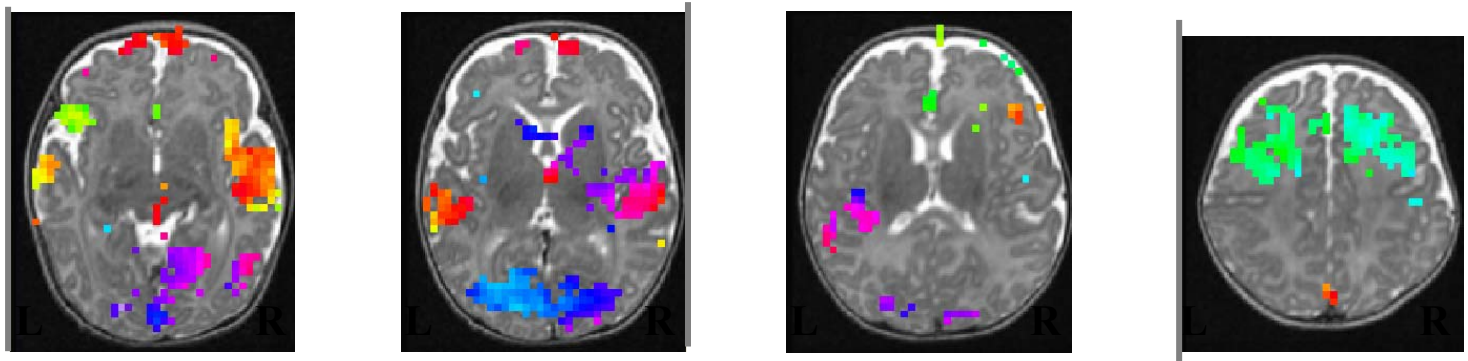
La **phase de la réponse** à une phrase unique varie de façon systématique dans les régions temporales supérieures et la région frontale inférieure



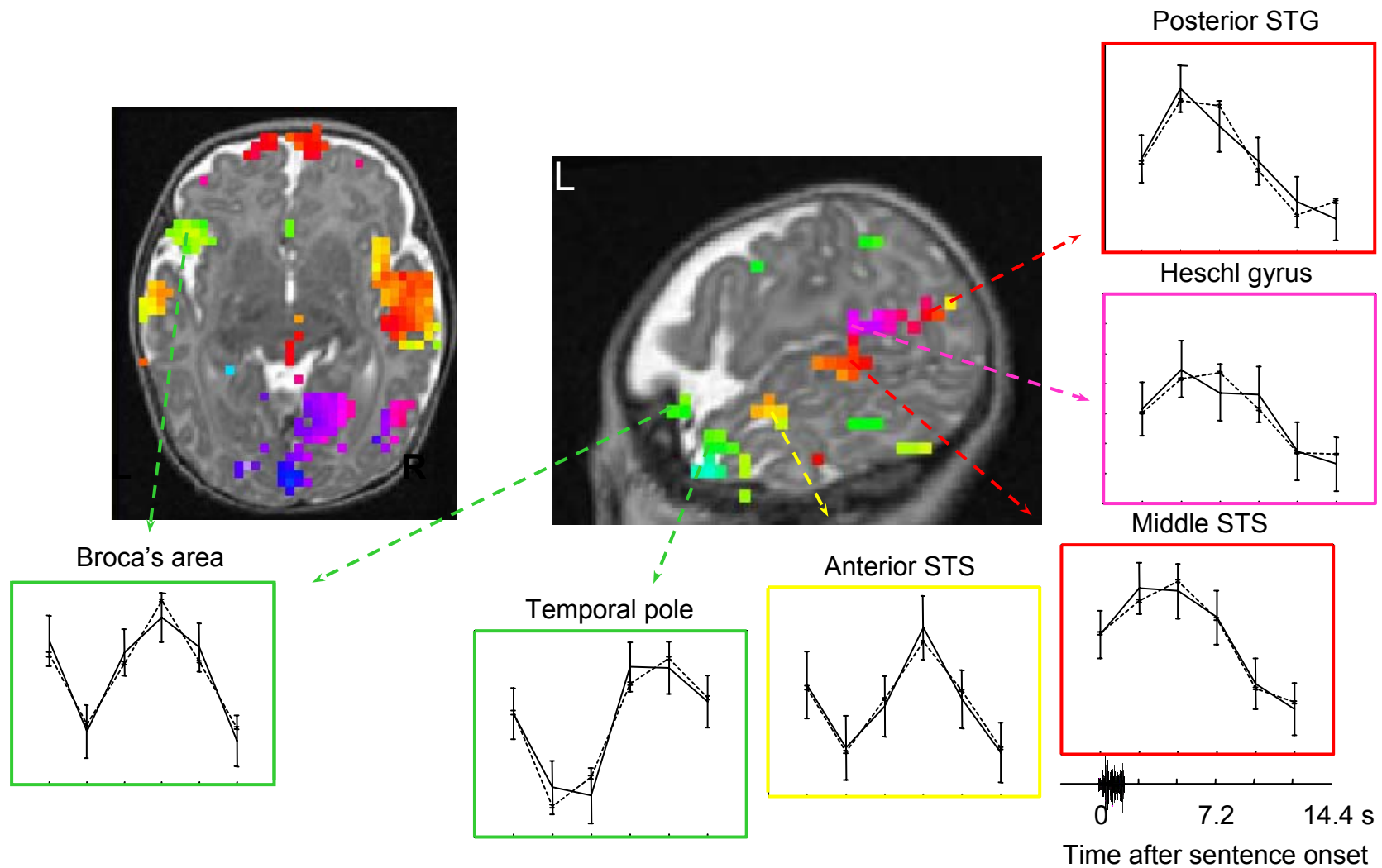
Phase de la réponse BOLD
en IRM fonctionnelle



Bébés de 2-3 mois



L'activité du cerveau du bébé de quelques mois, en réponse à des phrases, est déjà étroitement structurée.

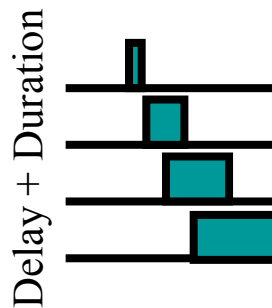
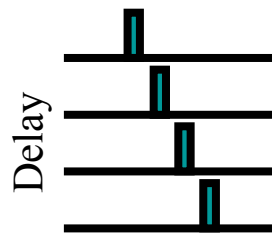


Exemple 3: Décomposition complète d'une tâche cognitive

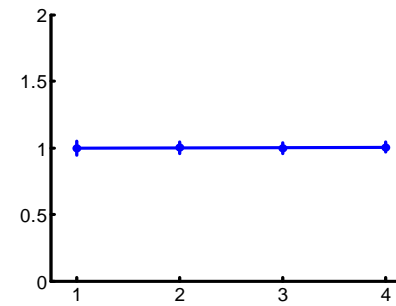
L'IRMf peut décomposer une tâche en fonction de la « signature » temporelle de chaque région en réponse à un facteur expérimental

En extrayant l'amplitude et la phase de la réponse, on peut distinguer:

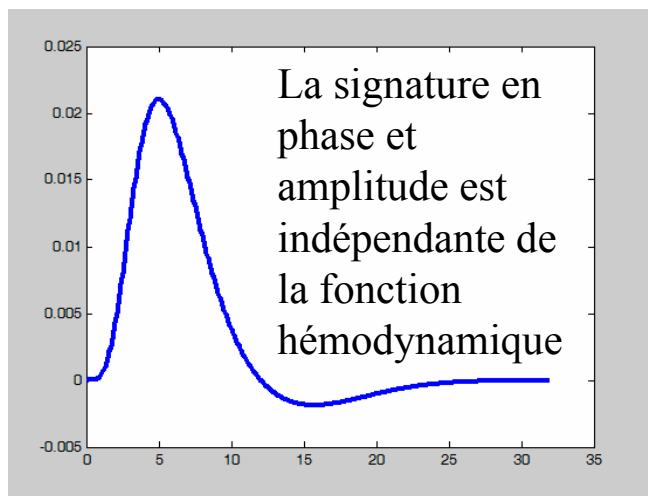
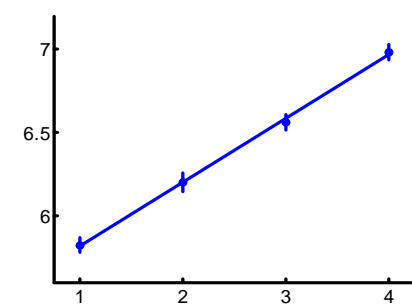
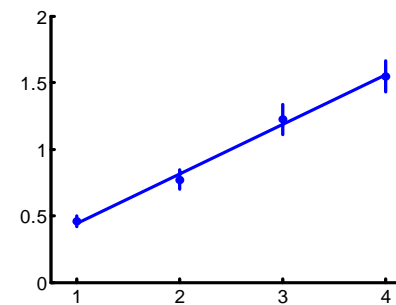
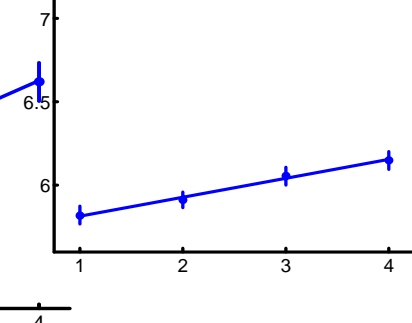
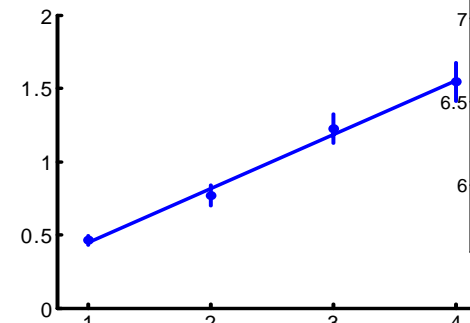
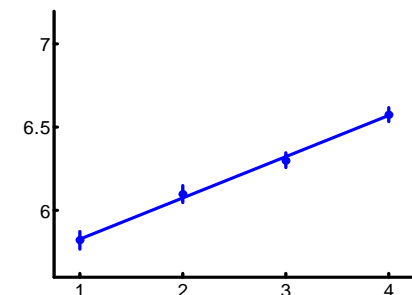
- Des régions dont ni l'entrée en activité, ni la durée ne varient
- Des régions dont l'entrée en activité seule varie
- Des régions dont la durée seule varie
- Des régions mixtes



Amplitude

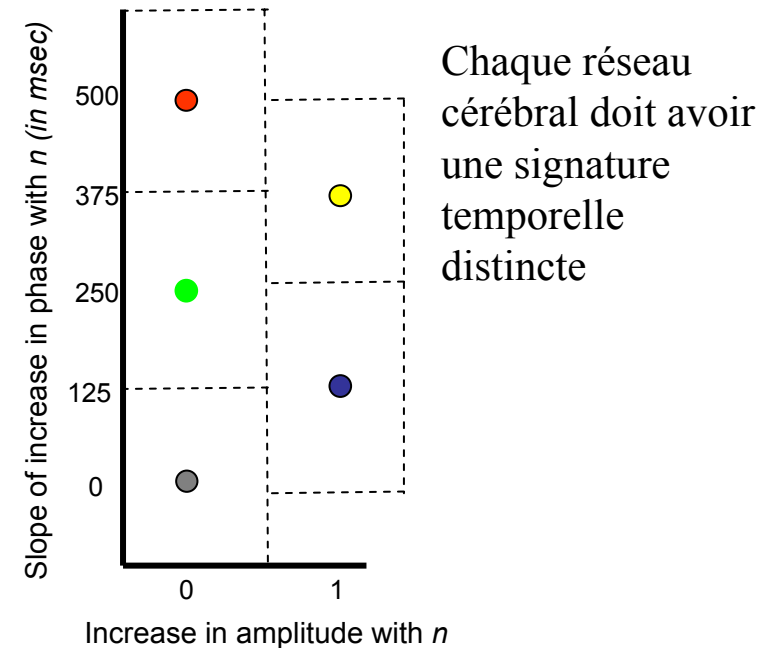
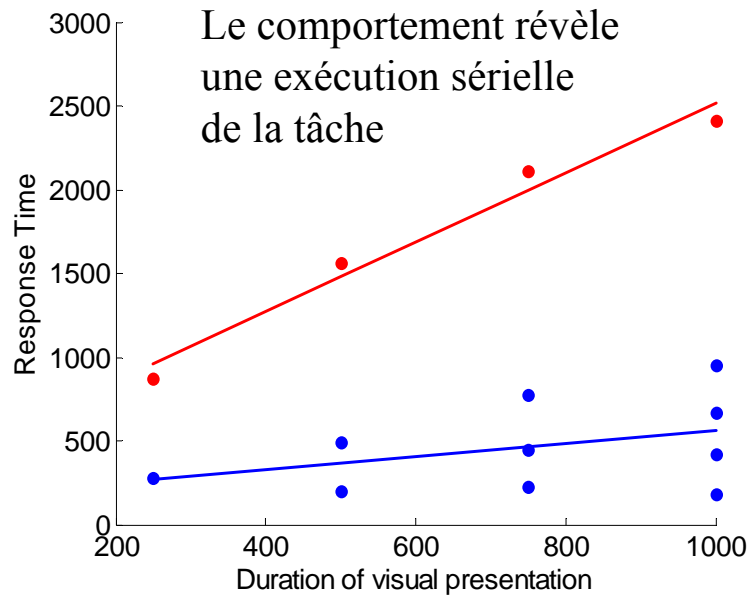
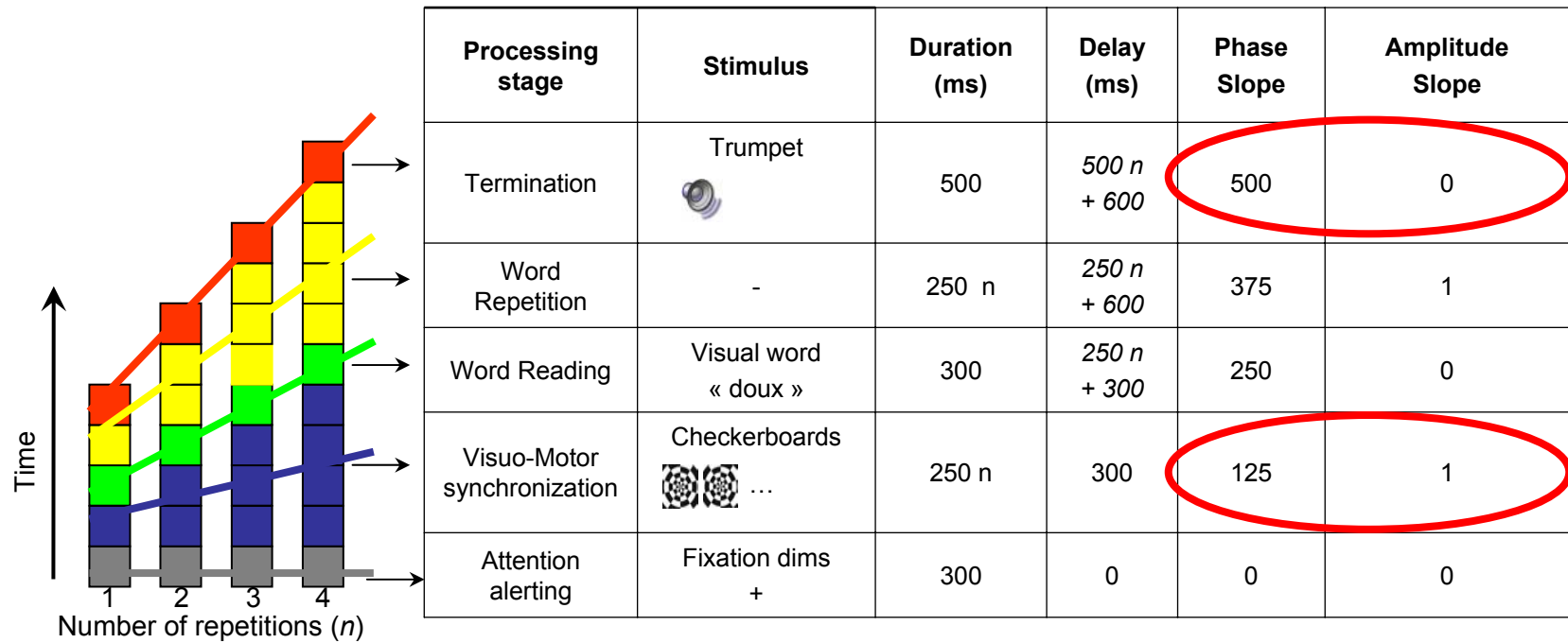


Phase



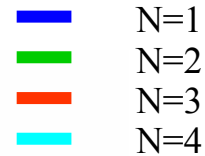
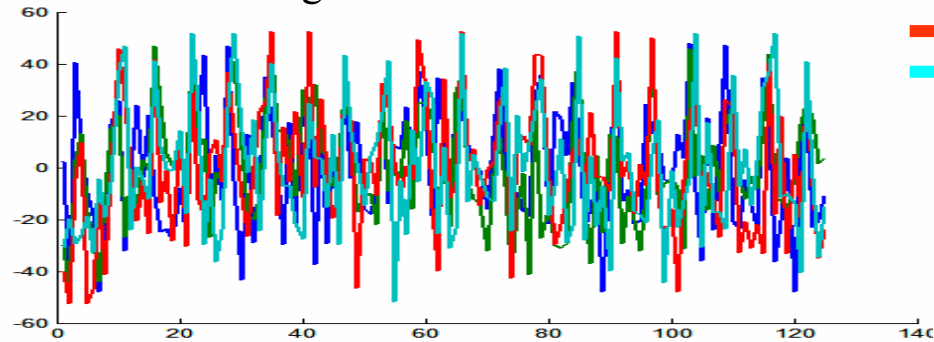
Sigman, M., Jobert, A., LeBihan, D., & Dehaene, S. (2006). Parsing a sequence of brain activations at psychological times using fMRI. *NeuroImage*, in press.

Exemple de décomposition d'une tâche cognitive complexe

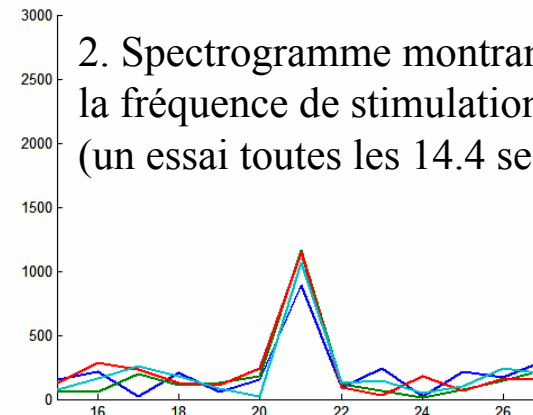


Exemple de traitement des données issues d'une région auditive

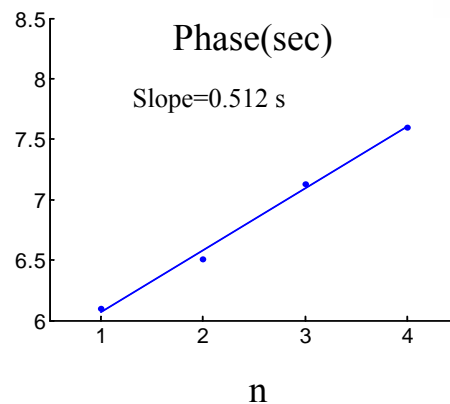
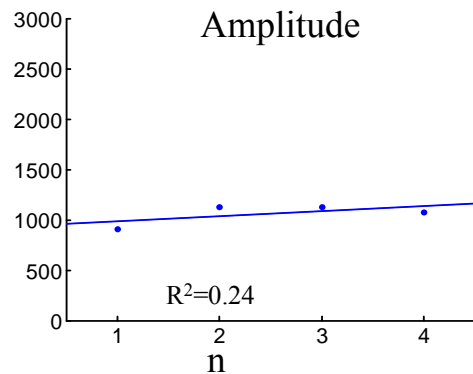
1. Signal brut enregistré dans une région auditive



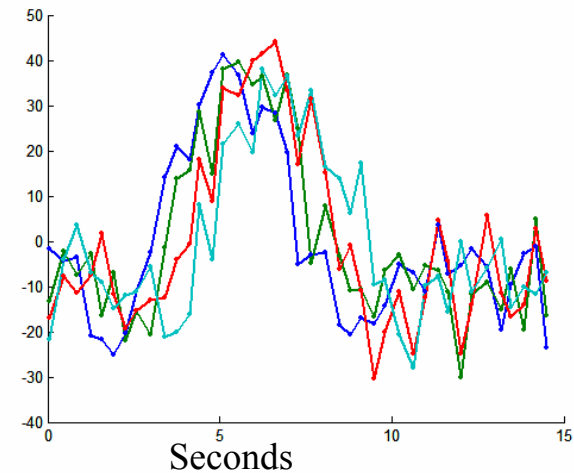
2. Spectrogram montrant une réponse à la fréquence de stimulation (un essai toutes les 14.4 secondes)



3. Signature en amplitude et en phase

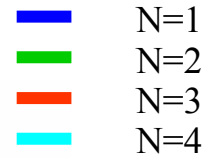
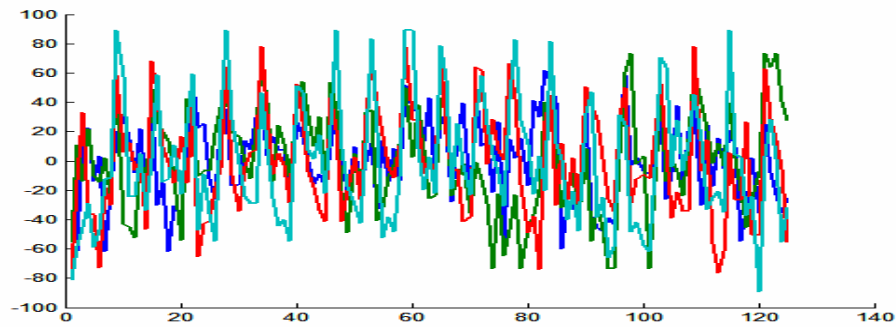


4. Réponse hémodynamique moyennée

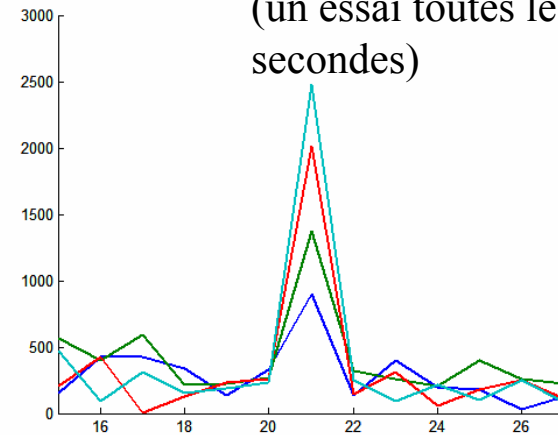


Exemple de traitement des données issues d'une région visuelle

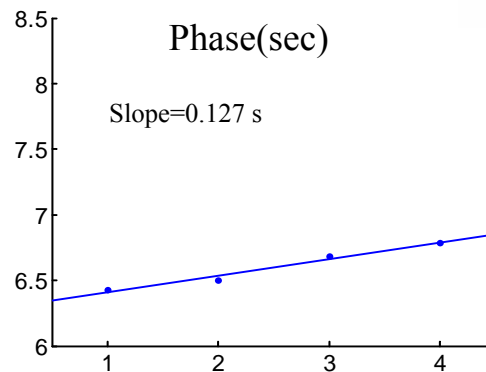
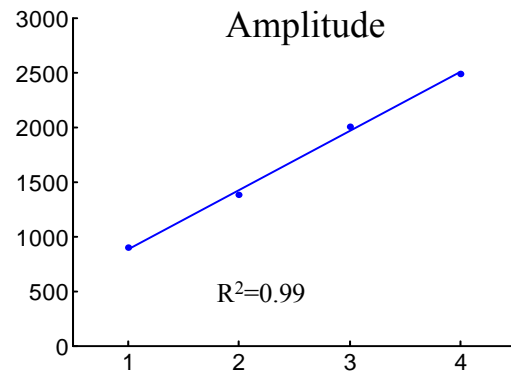
1. Signal brut enregistré dans une région visuelle



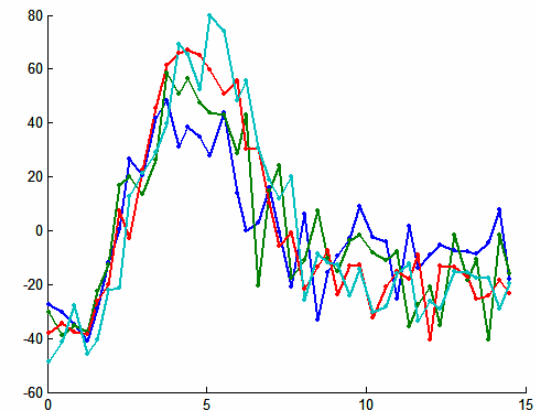
2. Spectrogramme montrant une réponse à la fréquence de stimulation (un essai toutes les 14.4 secondes)



3. Signature en amplitude et en phase

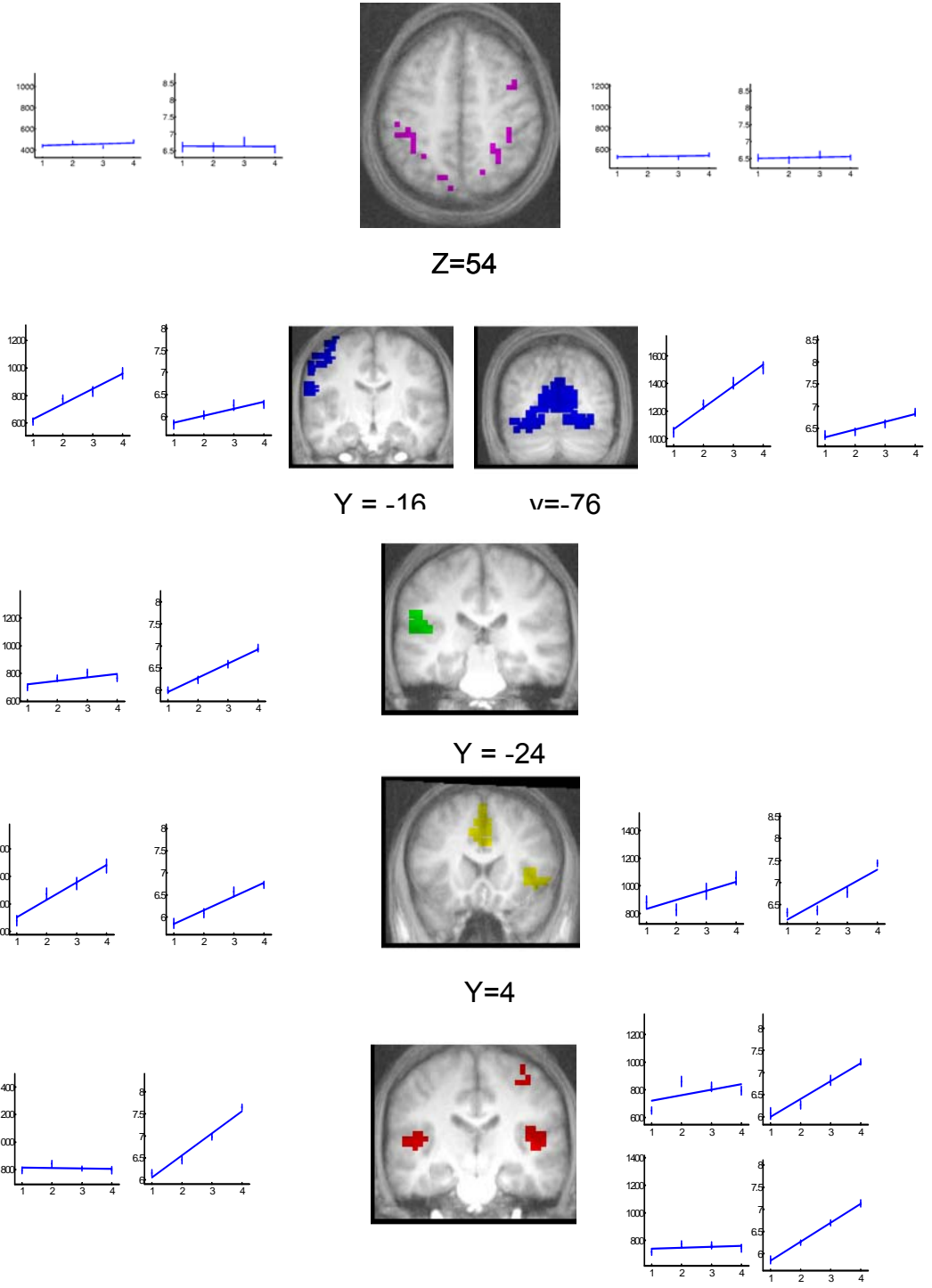


4. Réponse hémodynamique moyennée



Décomposition temporelle complète en 5 étapes

Stage 1 →
 Stage 2 →
 Stage 3 →
 Stage 4 →
 Stage 5

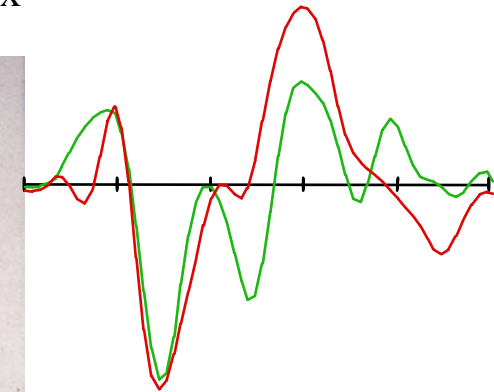
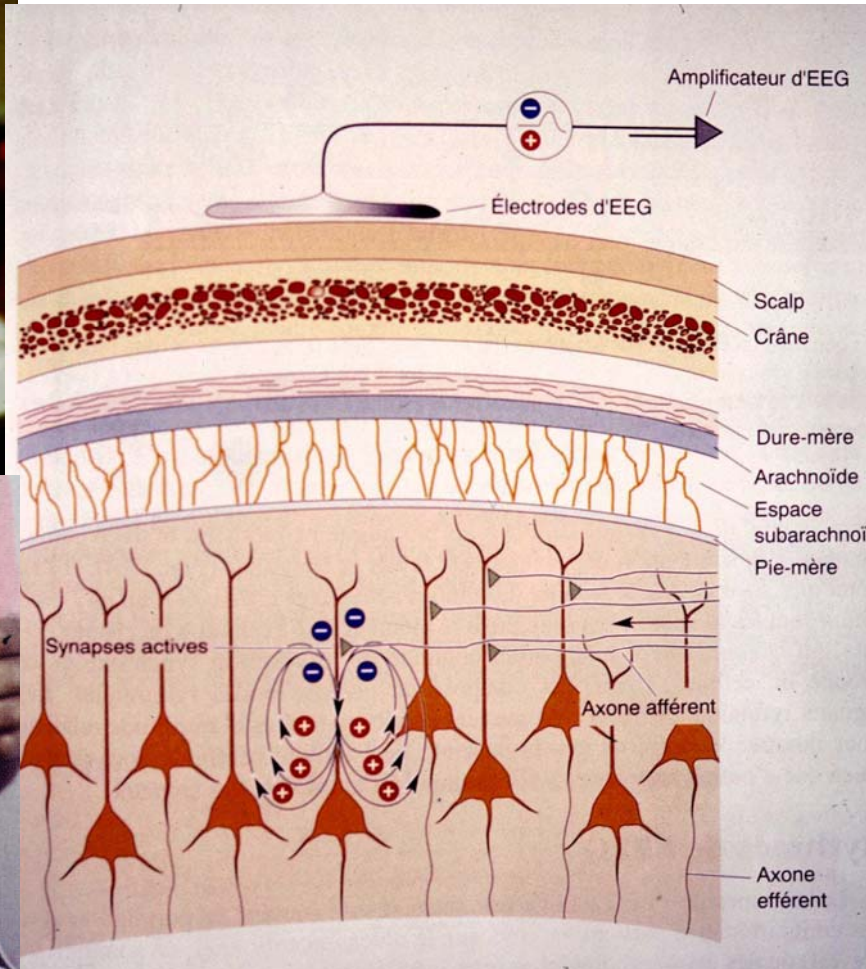
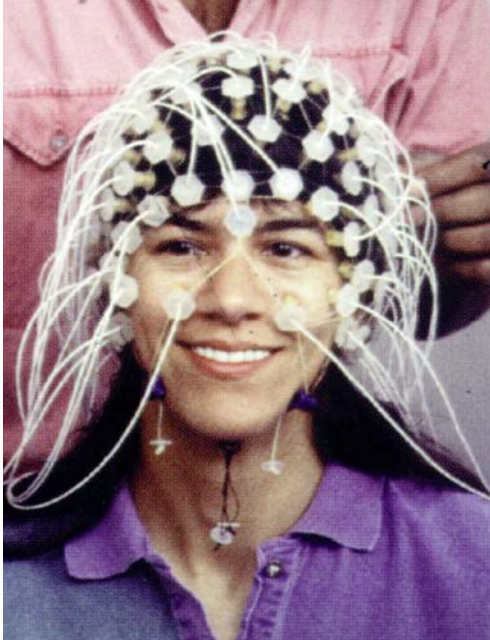


II. Méthodes fondées sur l'EEG et la MEG (électro- et magnéto-encéphalographie)

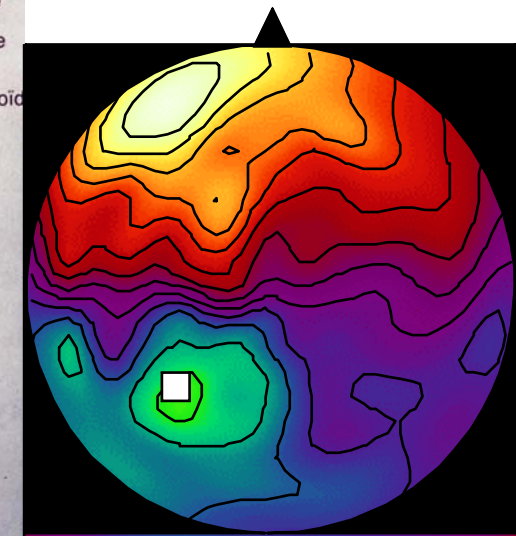
- L'électro- et la magnéto-encéphalographie détectent l'activité instantanée de populations de neurones
- La résolution spatiale de la MEG s'est également grandement améliorée

Electro-encéphalographie

- Signaux électriques essentiellement instantanés, facilement digitalisés toutes les quelques millisecondes
- Ambiguïté sur l'origine spatiale des signaux



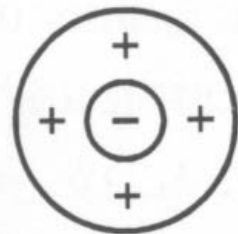
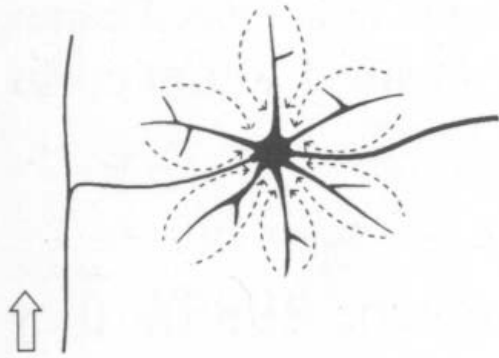
Décours temporel de l'EEG



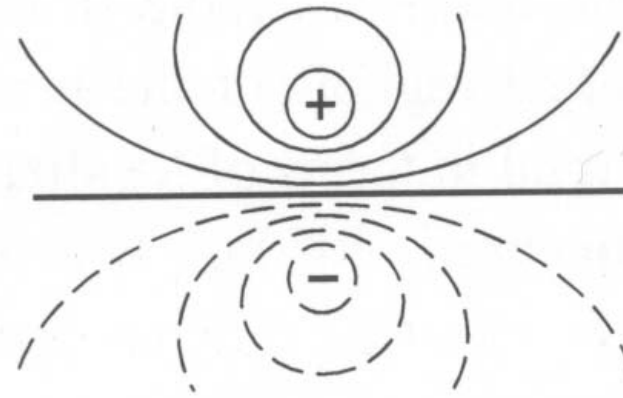
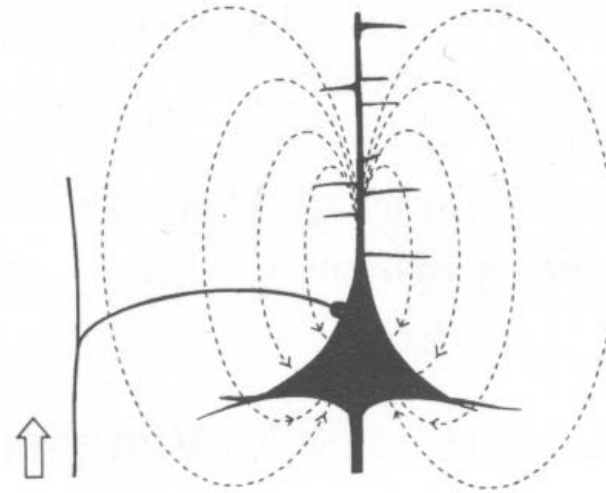
Cartes de voltage interpolées sur le scalp

Ce que voit l'électro-encéphalographie

Cellule en étoile

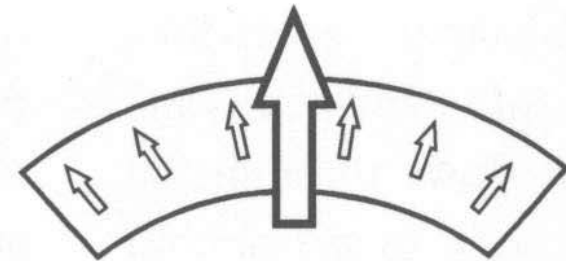
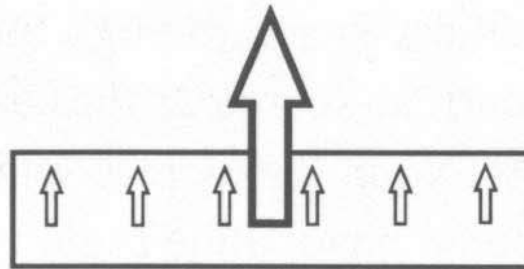
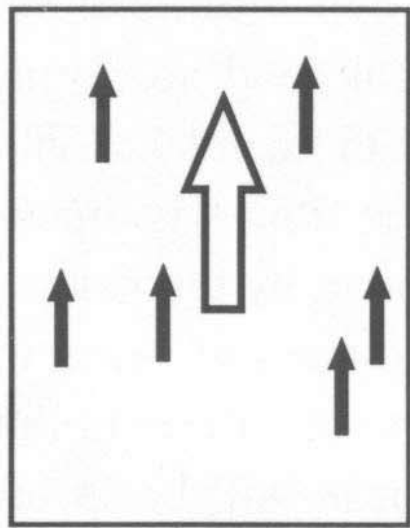
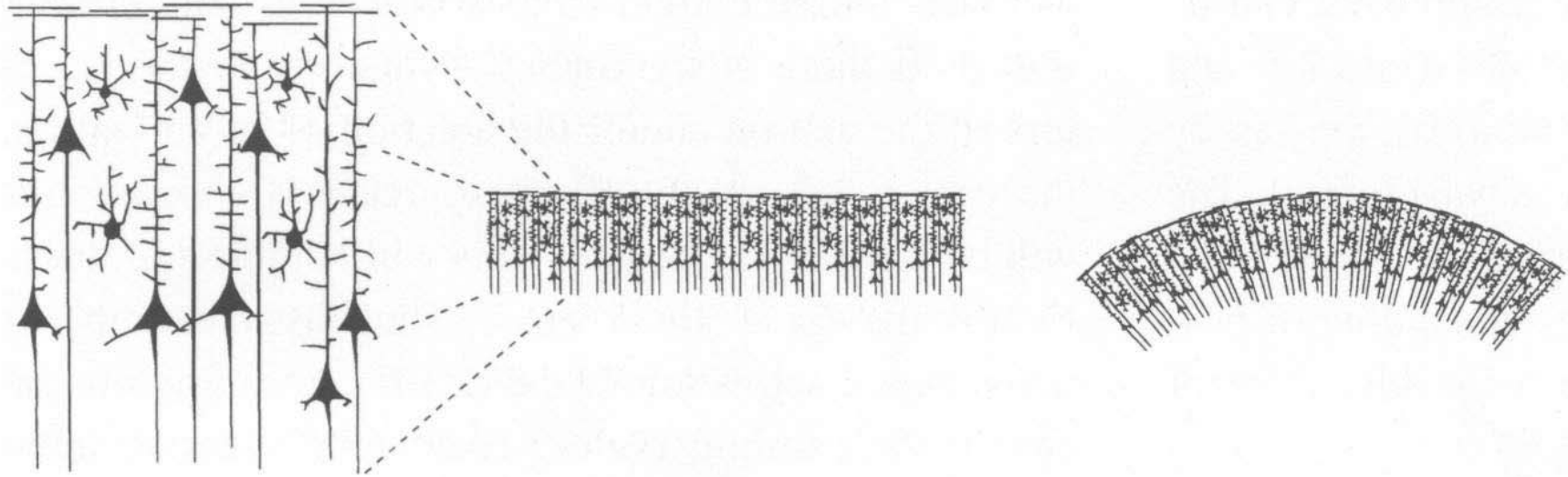


Cellule pyramidale



Notion de « dipôle équivalent »

L'EEG et la MEG ne voient bien que les régions où les neurones pyramidaux sont alignés et synchronisés)

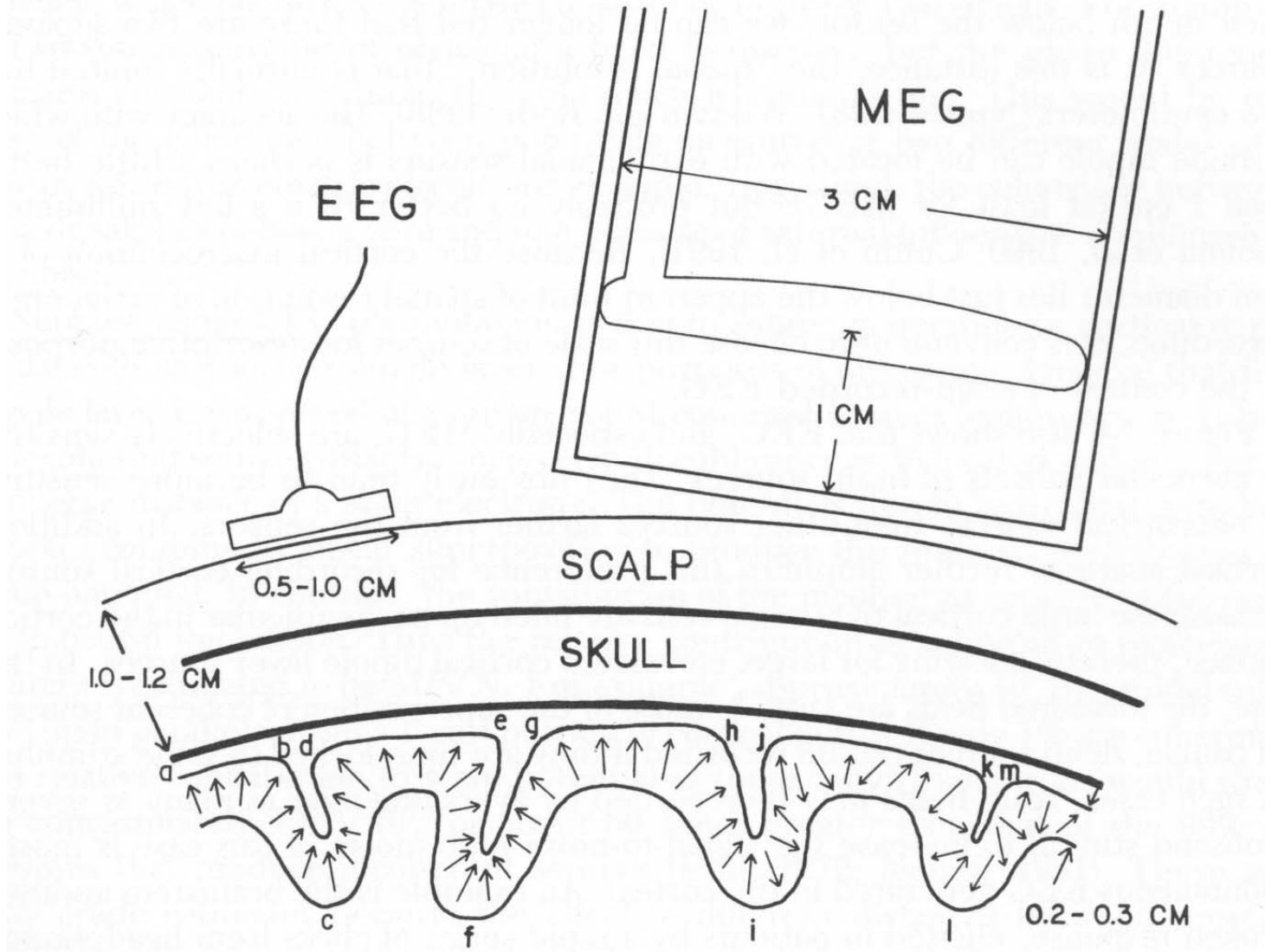


Magnéto-encéphalographie

- Signaux également quasi-instantanés, mais d'amplitude très faible (femtoTesla)
- Mesure moins déformée par la boîte crânienne, d'où une meilleure localisation (mais toujours ambiguë)
- Coût bien supérieur



- La magnéto-encéphalographie est moins sensible aux activations profondes
- Elle est également peu voire totalement insensible aux sources radiales



Exemple d'application de la MEG: Dynamique de l'activation du « système miroir » chez l'homme

Condition verbale



Condition
neutre

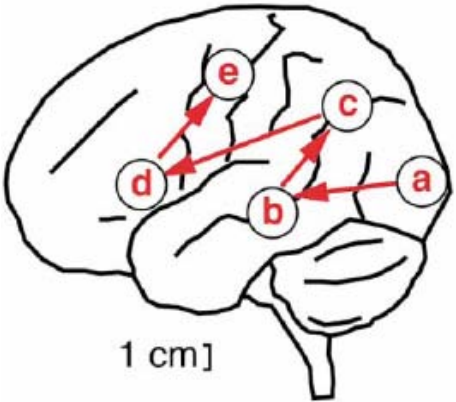
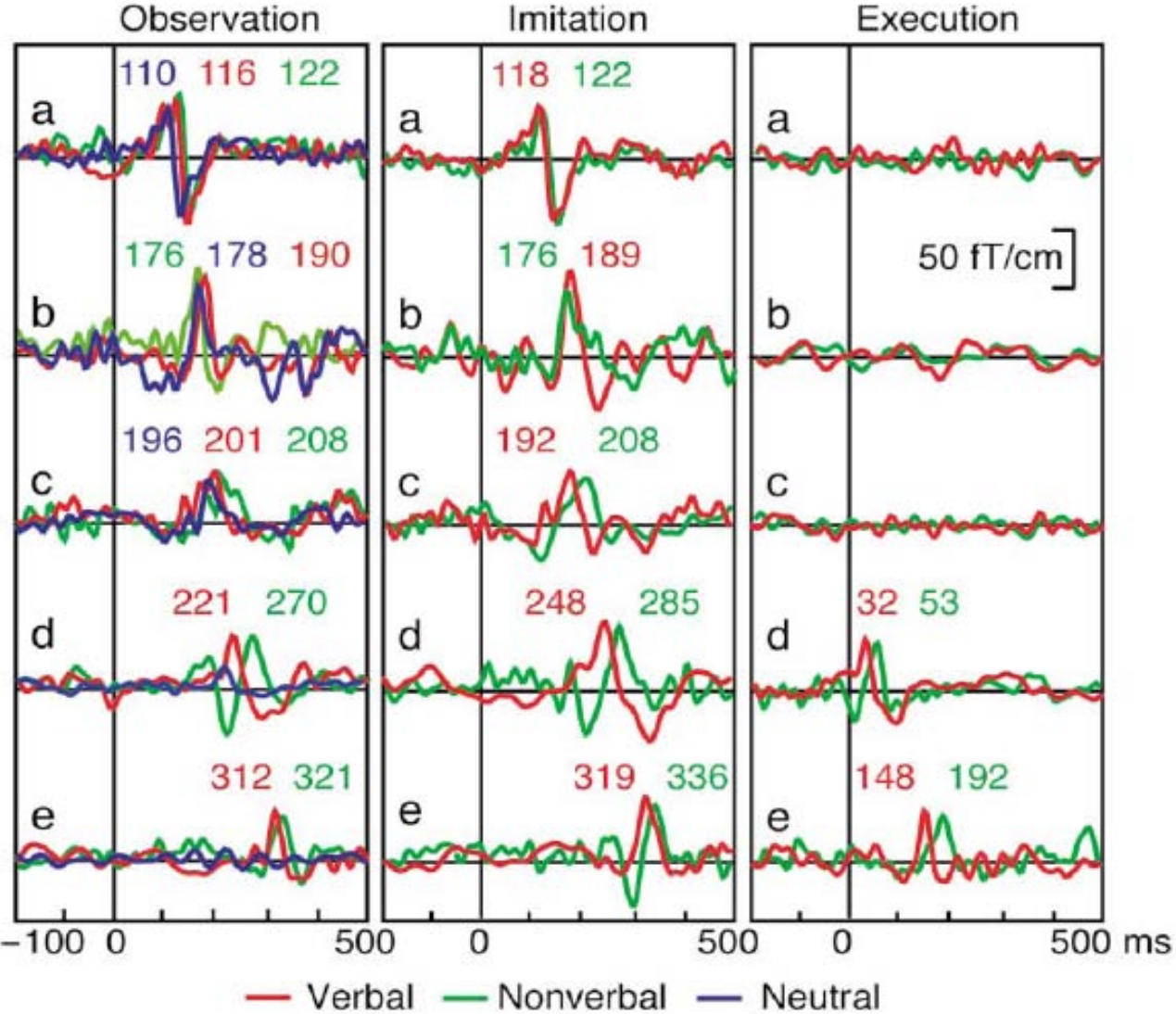


Condition non-verbale

- Existe-t-il une activation automatique d'un « système miroir » de reconnaissance et d'imitation des actions chez l'homme?
- Quelles sont les régions concernées et dans quel ordre s'activent-elles?
- Protocole expérimental
 - Imagerie en magnéto-encéphalographie (NeuroMag, 306 canaux)
 - Présentation de visages statiques, pris en train d'exécuter une action motrice évidente, soit verbale, soit non-verbale.
 - Contrôle = condition neutre
 - Trois tâches demandées aux participants:
 - Regarder passivement
 - Imiter l'action
 - Produire l'action en l'absence de stimulus visuel

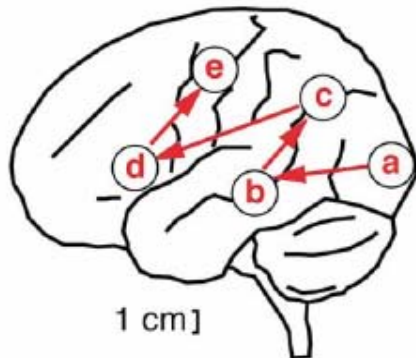
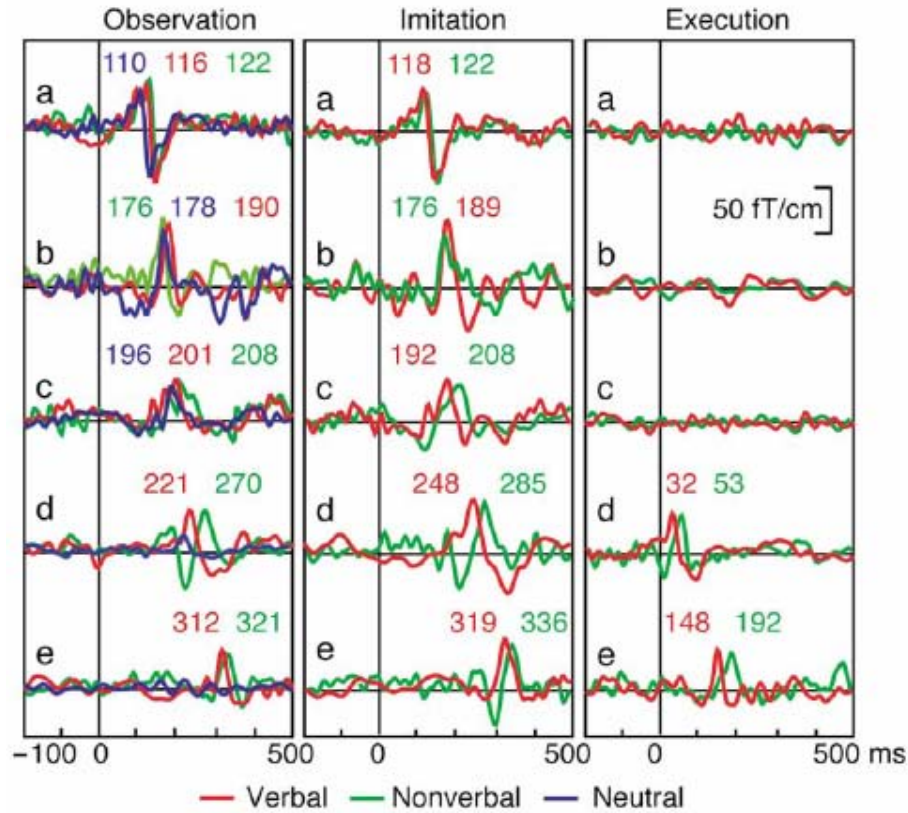
Nishitani, N., & Hari, R. (2002). Viewing lip forms: Cortical dynamics. *Neuron*, 36, 1211-1220.

Résultats chez un sujet unique: une séquence complète d'activation

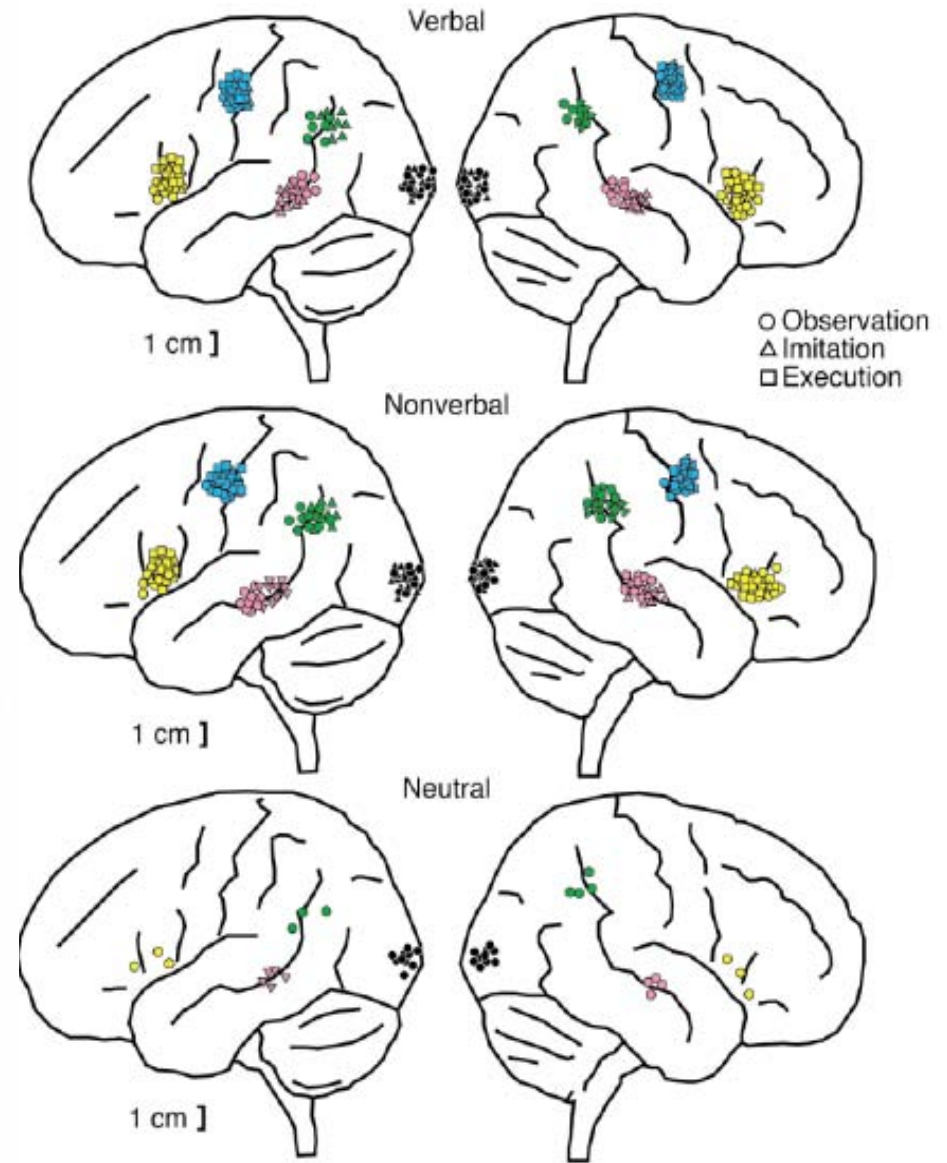


Nishitani, N., & Hari, R. (2002). Viewing lip forms: Cortical dynamics. *Neuron*, 36, 1211-1220.

Résultats chez un sujet unique



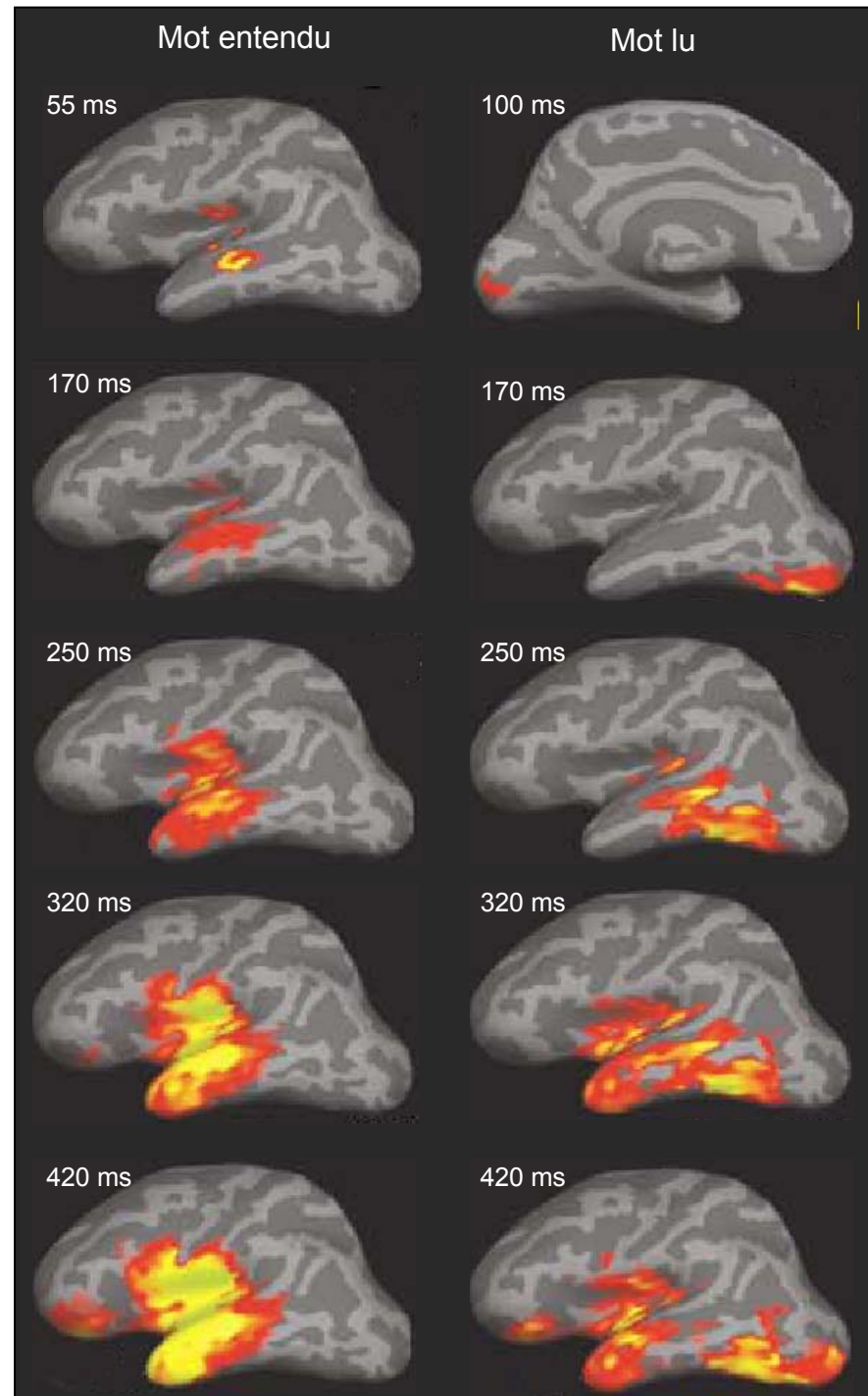
Résultats à travers tous les sujets



Autre exemple: Décours temporel de l'activation aux mots (entendus ou lus)

Marinkovic, K., Dhond, R. P., Dale, A. M., Glessner, M., Carr, V., & Halgren, E. (2003). Spatiotemporal dynamics of modality-specific and supramodal word processing. *Neuron*, 38(3), 487-497.

Mais la localisation reste sujette à caution.



II. Une voie de recherche possible :
l'enregistrement simultané EEG et IRMf

Enregistrement **simultané** de l'activation en EEG et en IRM fonctionnelle

- Utilisation d'électrodes et d'amplificateurs spéciaux compatibles avec l'IRM

- Artefacts liés

- Aux gradients d'IRMf

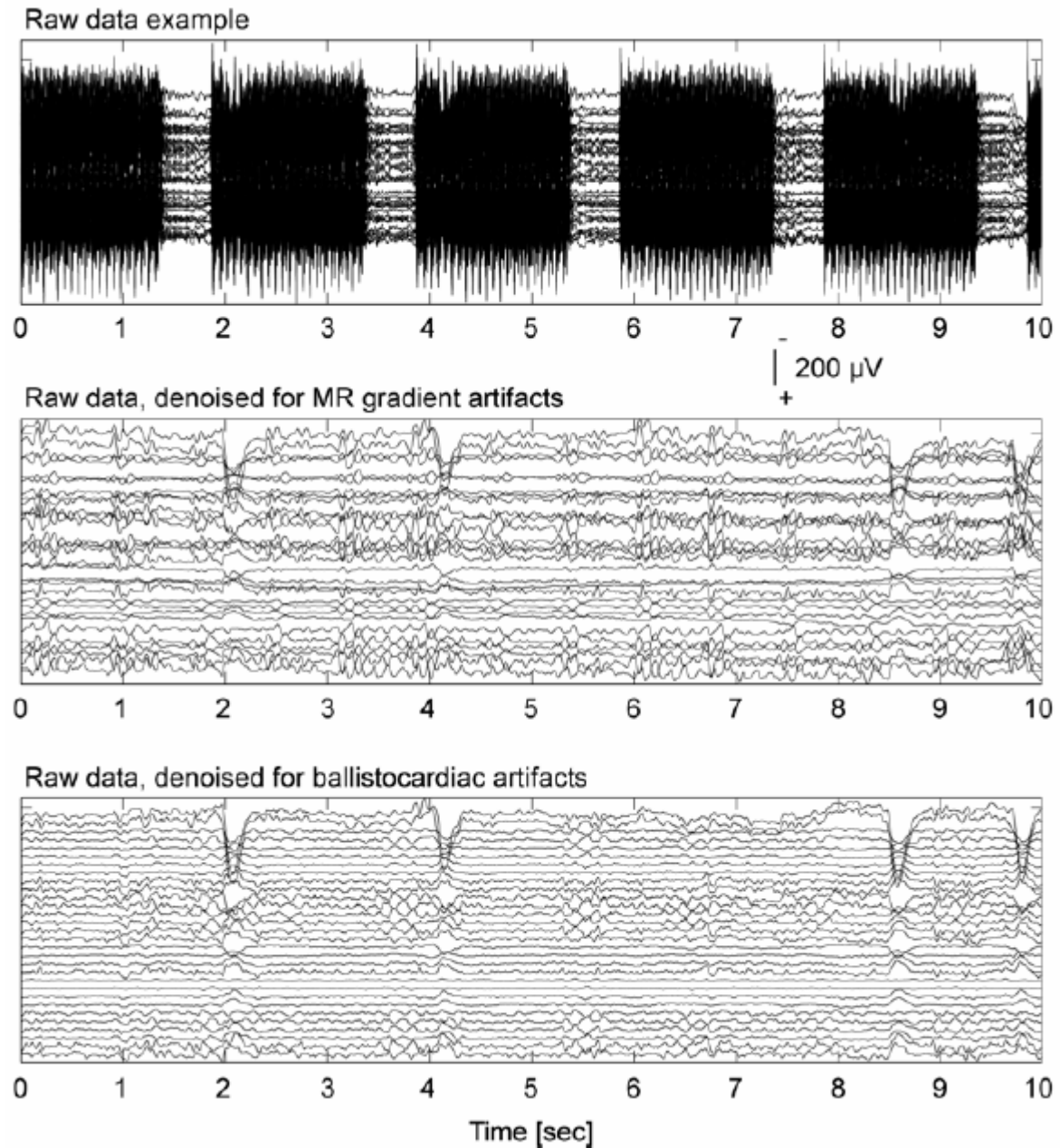
- Aux mouvements cardiaques et respiratoires

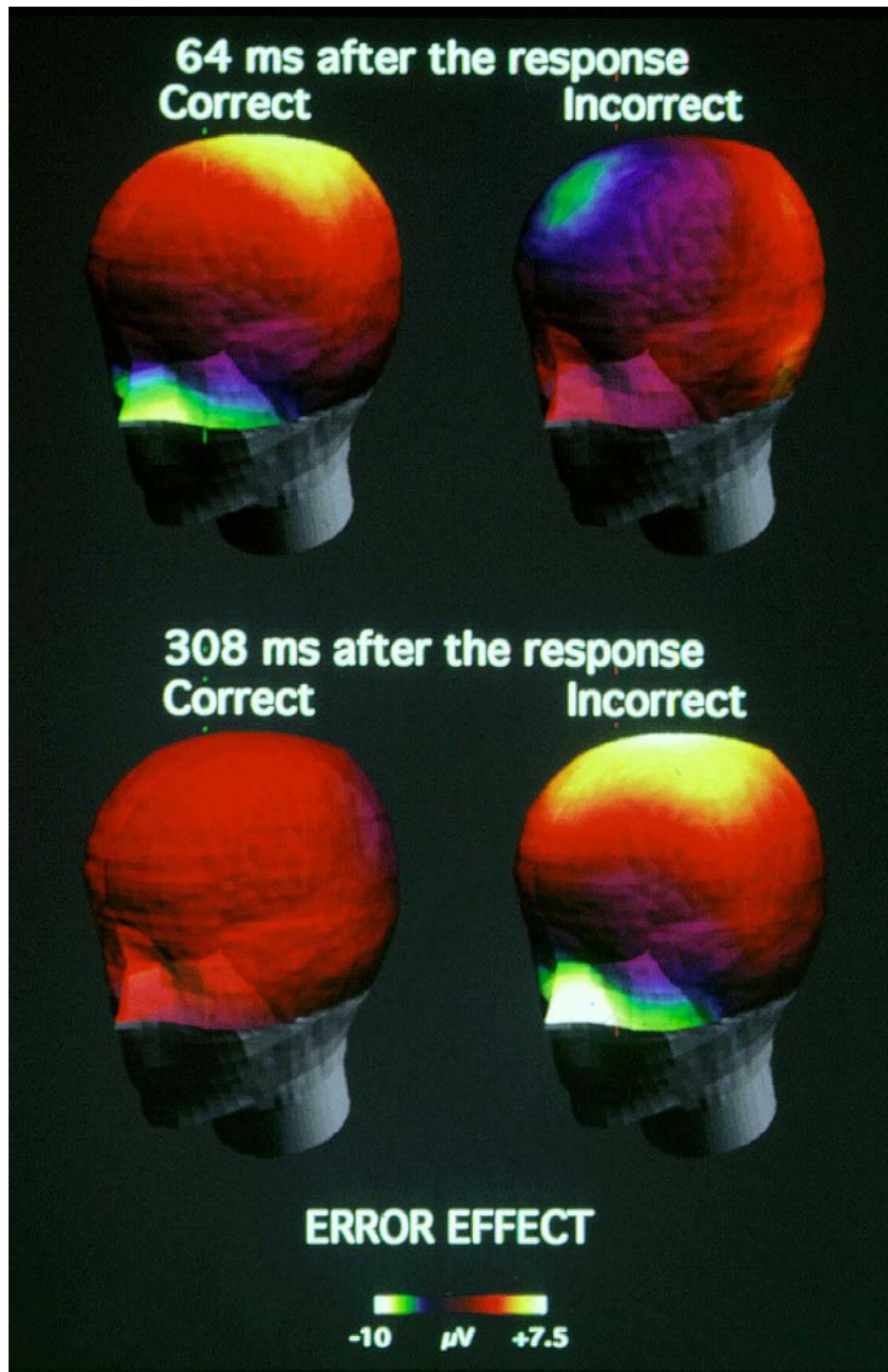
- Intérêt dans des cas bien précis:

- Signaux non-reproductibles

(crises d'épilepsie, activité cérébrale spontanée)

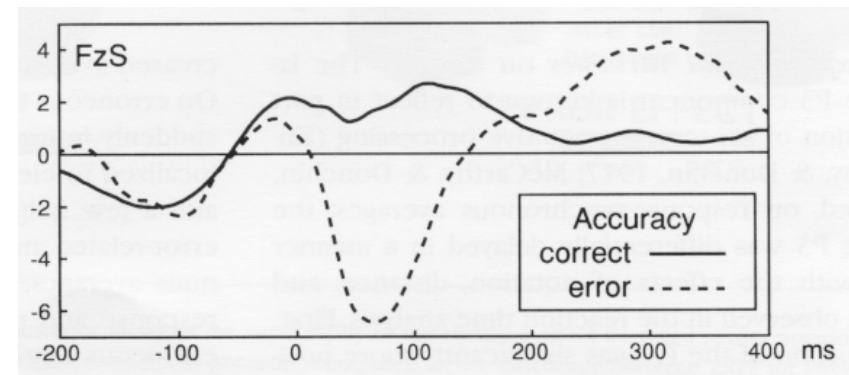
- Corrélation des fluctuations spontanées en EEG et IRM fonctionnelle





Exemple d'application: la négativité à l'erreur

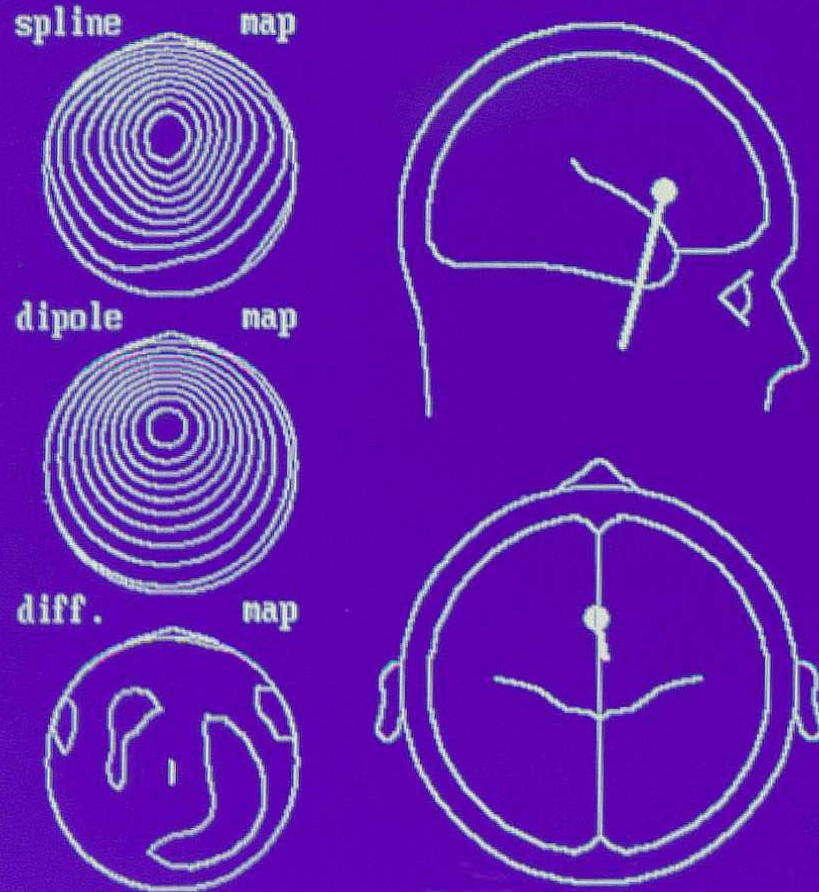
- Découverte par Gehring, 1993
- Localisation plausible: Dehaene, Posner & Tucker, 1994
- Localisation en IRMf: Carter, 1998
- Localisation définitive par EEG + IRMf: Debener, 2005



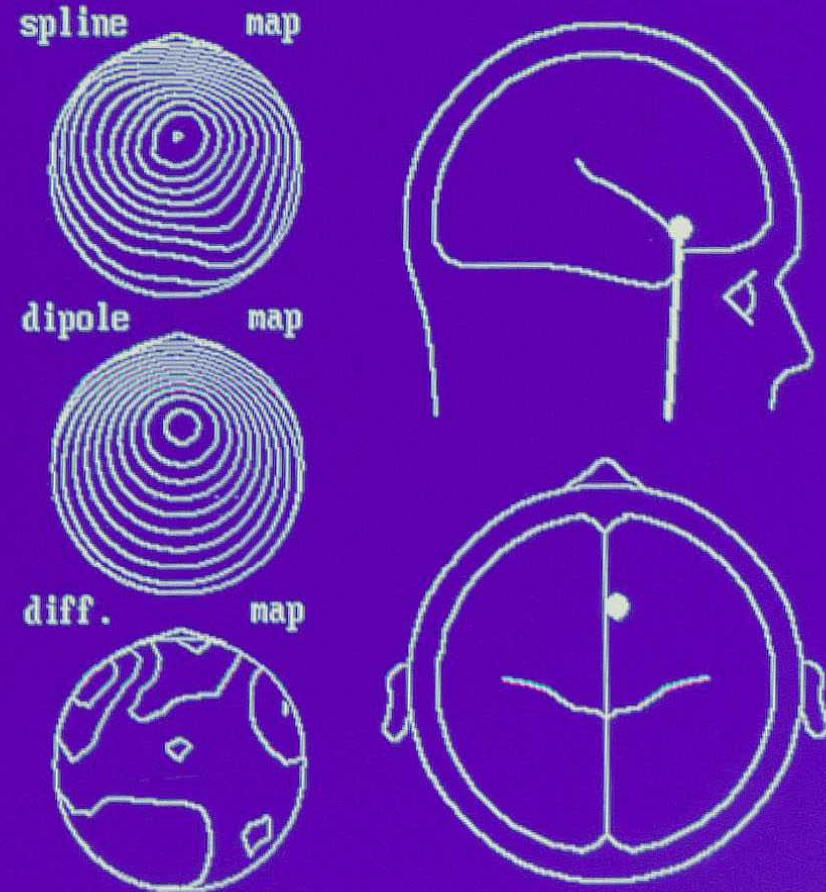
Dehaene, S., Posner, M. I., & Tucker, D. M. (1994). Localization of a neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, 5, 303-305.

Localisation à la région préfrontale médiane / cortex cingulaire antérieur

Number comparison (Exp. 1)

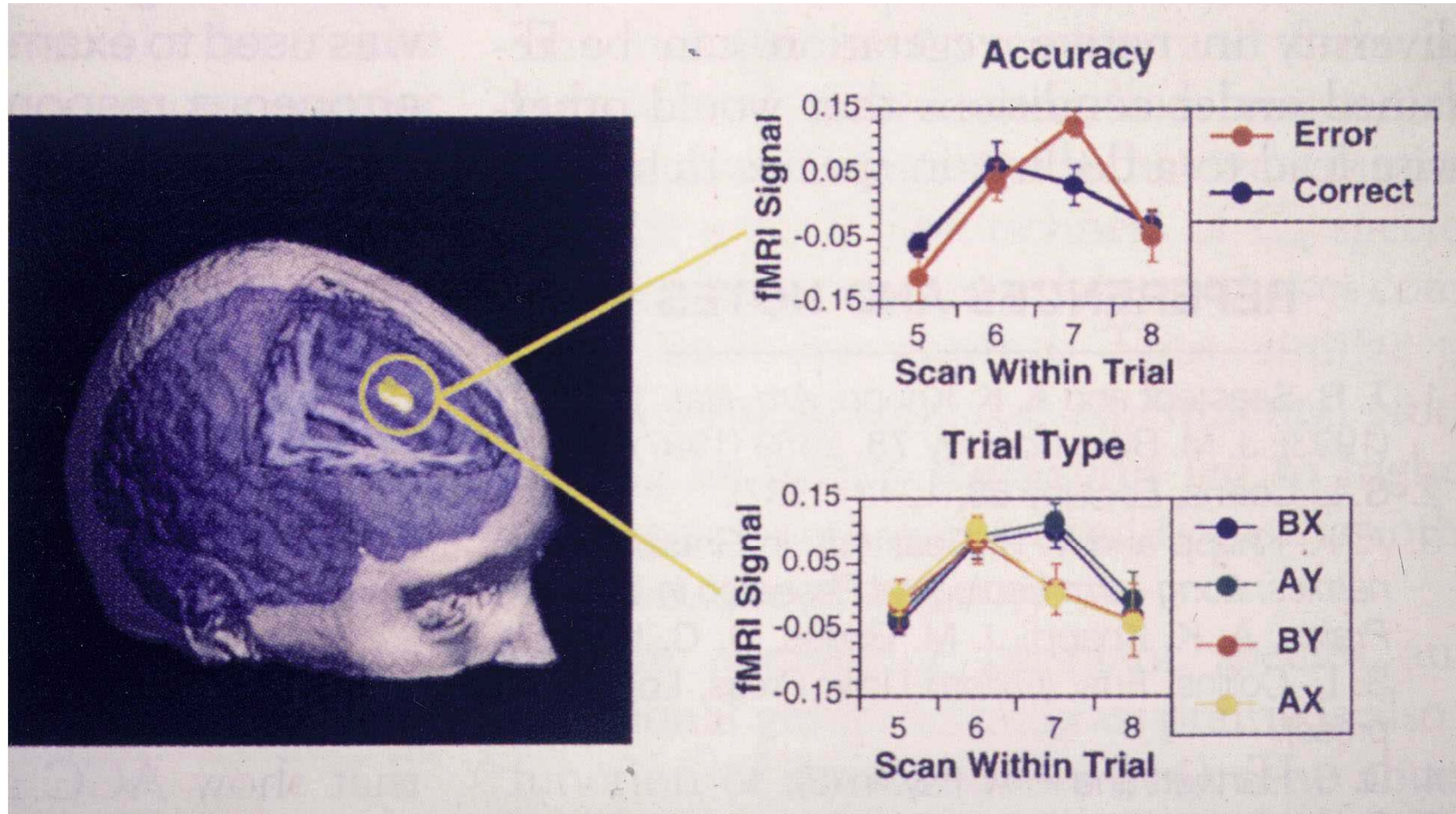


Semantic categorization (Exp. 2)



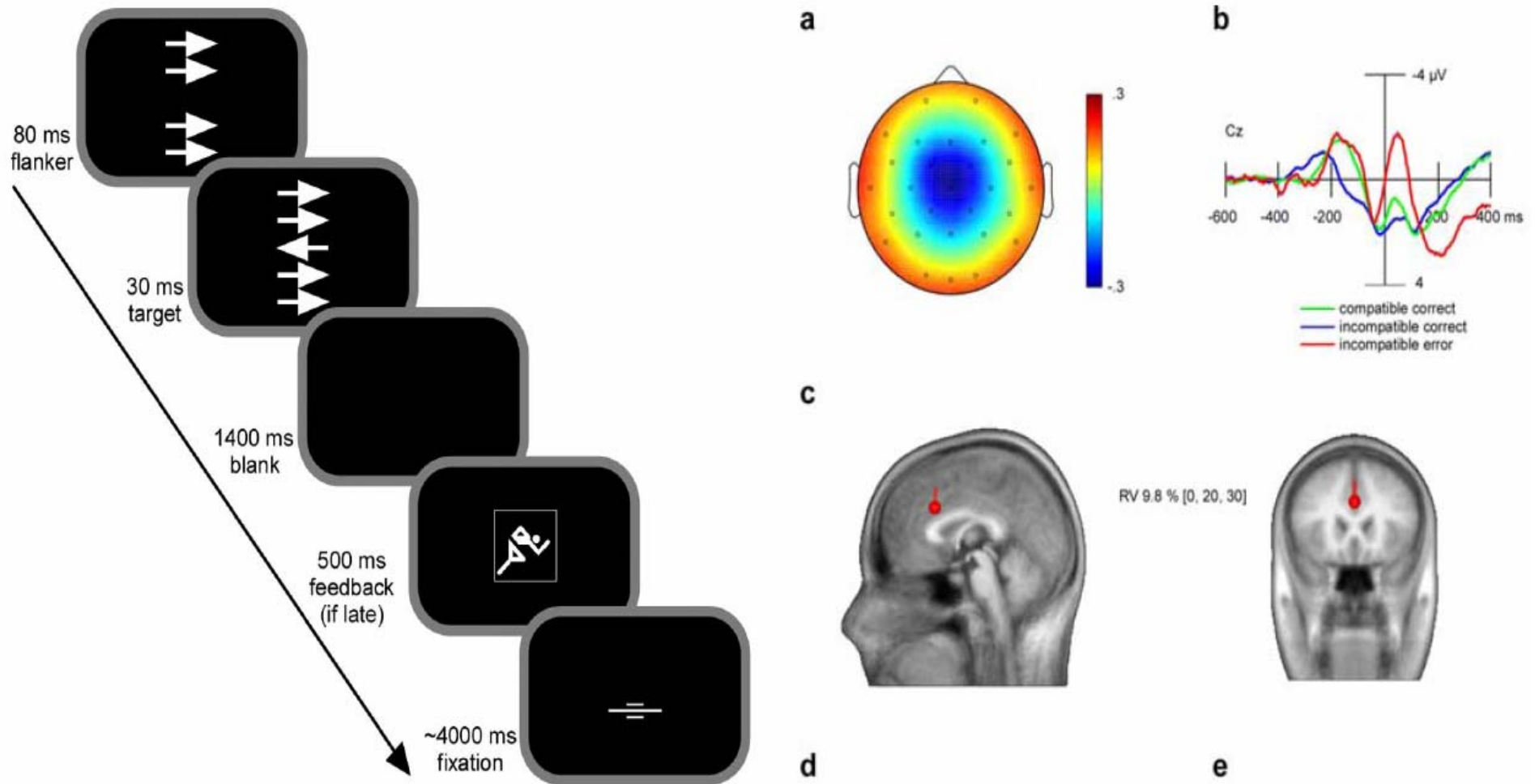
Dehaene, S., Posner, M. I., & Tucker, D. M. (1994). Localization of a neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, 5, 303-305.

Confirmation de cette localisation par l'IRM fonctionnelle (mais de nombreuses autres régions sont également activées)



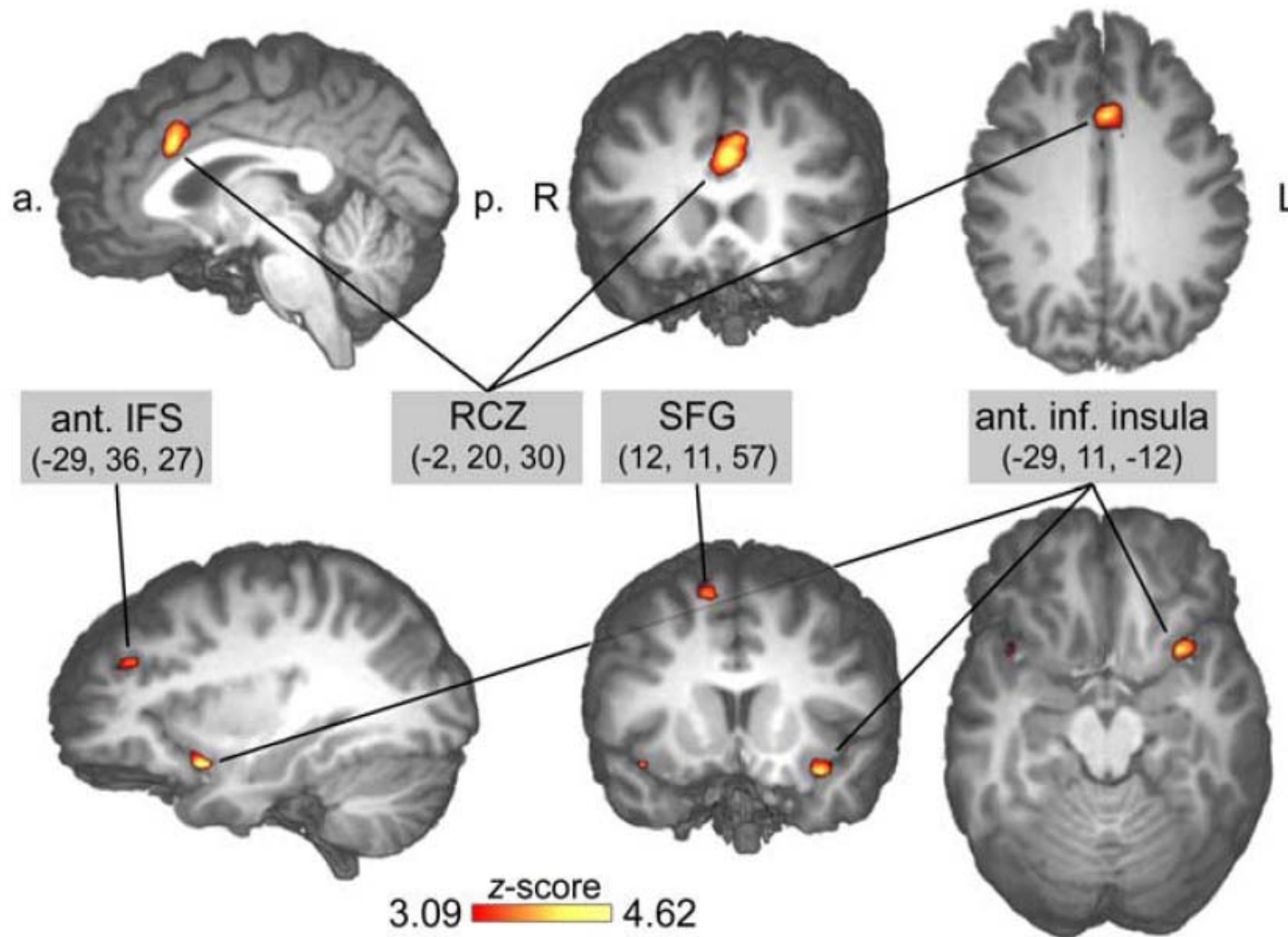
Carter, C. S., Braver, T. S., Barch, D., Botvinick, M. M., Noll, D., & Cohen, J. D. (1998). Anterior cingulate cortex, error detection, and the online monitoring of performance. *Science*, 280, 747-749.

L'expérience de Debener et al.: Induction d'erreurs fréquentes et enregistrement de la négativité à l'erreur simultanément à l'IRMf



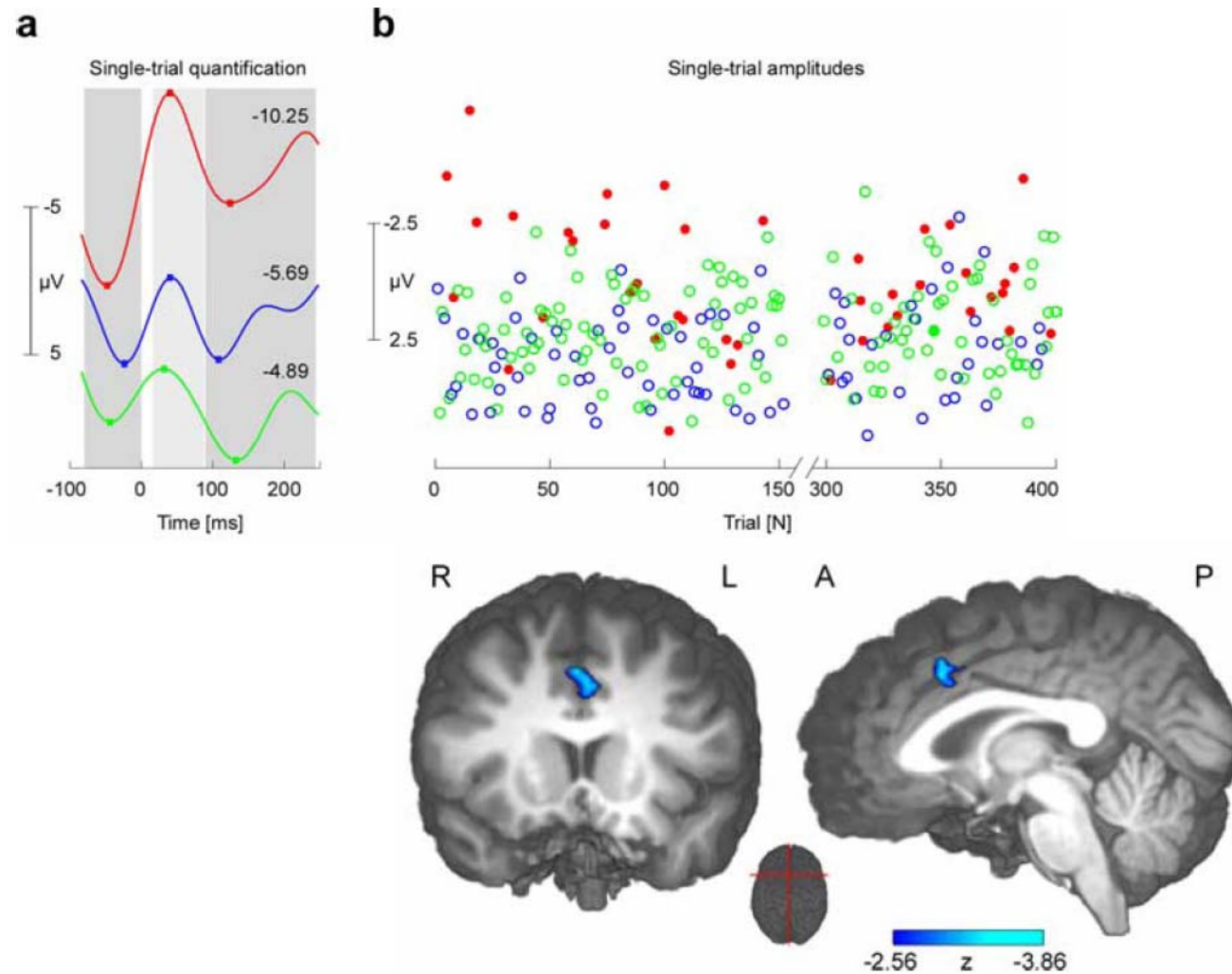
Debener, S., Ullsperger, M., Siegel, M., Fiehler, K., von Cramon, D. Y., & Engel, A. K. (2005). Trial-by-trial coupling of concurrent electroencephalogram and functional magnetic resonance imaging identifies the dynamics of performance monitoring. *J Neurosci*, 25(50), 11730-11737.

Un vaste circuit distribué est activé en IRMf lorsque l'on contraste erreurs et essais corrects



Debener, S., Ullsperger, M., Siegel, M., Fiehler, K., von Cramon, D. Y., & Engel, A. K. (2005). Trial-by-trial coupling of concurrent electroencephalogram and functional magnetic resonance imaging identifies the dynamics of performance monitoring. *J Neurosci*, 25(50), 11730-11737.

Seul le cortex cingulaire antérieur corrèle avec l'amplitude de la négativité à l'erreur à travers les différents essais



Debener, S., Ullsperger, M., Siegel, M., Fiehler, K., von Cramon, D. Y., & Engel, A. K. (2005). Trial-by-trial coupling of concurrent electroencephalogram and functional magnetic resonance imaging identifies the dynamics of performance monitoring. *J Neurosci*, 25(50), 11730-11737.

Conclusion

- La combinaison EEG+IRMf pose encore de nombreuses difficultés techniques, notamment à haut champ
- Néanmoins, la corrélation des deux signaux peut permettre d'attribuer une « étiquette temporelle » aux activations en IRMf
- On aurait alors la résolution spatiale de l'IRMf (*sans* difficultés liées au problème inverse), avec la précision temporelle de l'EEG.
- L'IRMf, seule, n'est pas totalement dépourvue de résolution temporelle
- Cette résolution temporelle pourrait encore s'améliorer avec les nouvelles méthodes de mesure de l'activité neuronale en IRMf (Lebihan et al. 2006)
- Pour l'instant, l'électro- et la magnéto-encéphalographie offrent la résolution temporelle la plus proche des temps cognitifs, sans pour autant sacrifier totalement la résolution spatiale.