

**Cours 2013:**

**Le bébé statisticien**

Stanislas Dehaene

Chaire de Psychologie Cognitive Expérimentale

Cours n°3

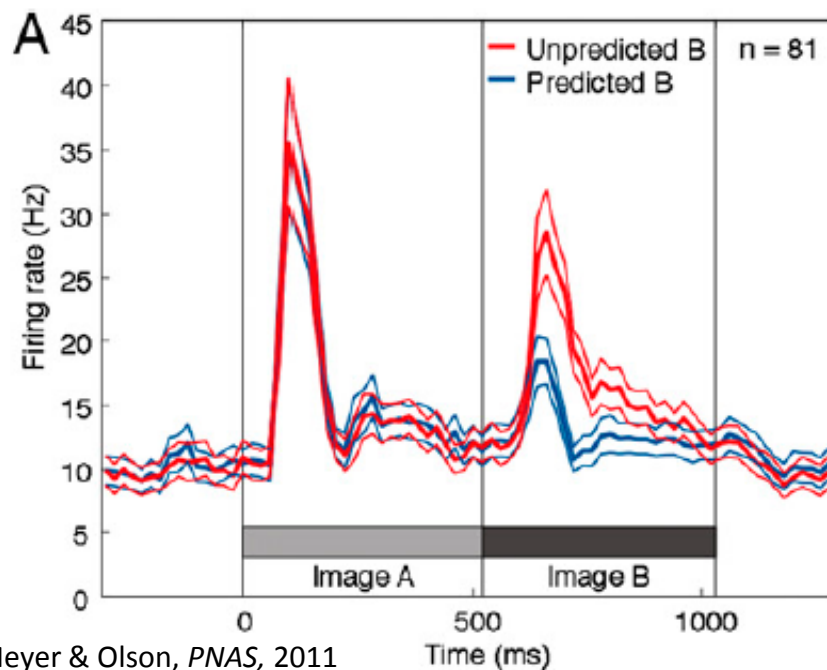
**L'apprentissage de régularités statistiques**

# Le cerveau génère des prédictions temporelles: Rappels

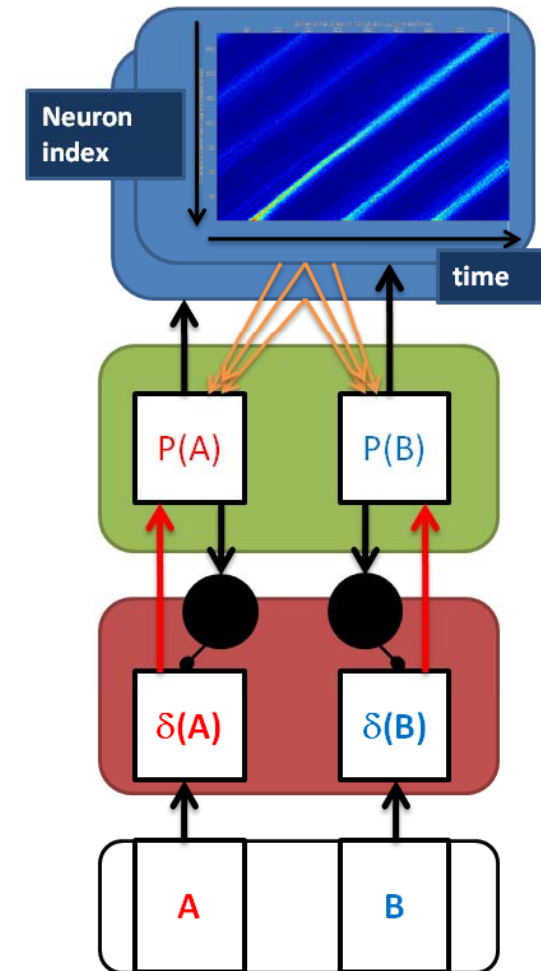
L'hypothèse du « cerveau Bayésien » suggère que notre cerveau infère, à partir des entrées sensorielles, un **modèle interne** du monde extérieur.

A son tour, ce modèle interne peut être utilisé pour créer des **anticipations** sur les entrées sensorielles...

et un effet de **surprise** liée à l'**erreur de prédiction** quand celles-ci sont violées.



Memory trace  
(synfire chain)



Maximiser la vraisemblance  $p(h|e)$  d'un modèle des entrées sensorielles implique de minimiser l'erreur de prédiction sur ces entrées  $e$ . (Mumford, 1992; Rao & Ballard, 1999; Friston, 2005; modèle Wacongne, Changeux et Dehaene, 2012).

# Le cerveau du bébé génère-t-il des attentes, et code-t-il l'erreur de prédiction?



Dehaene-Lambertz, G., & Dehaene, S. (1994).  
Speed and cerebral correlates of syllable  
discrimination in infants. *Nature*, 370, 292-295.<sup>2</sup>

16 bébés de 3 mois  
Filet de 64 électrodes.

Adaptation à une série de  
syllables identiques:  
ba ba ba ba (ou, selon le bébé, ga  
ga ga ga)  
(une syllabe toutes les 600 ms)

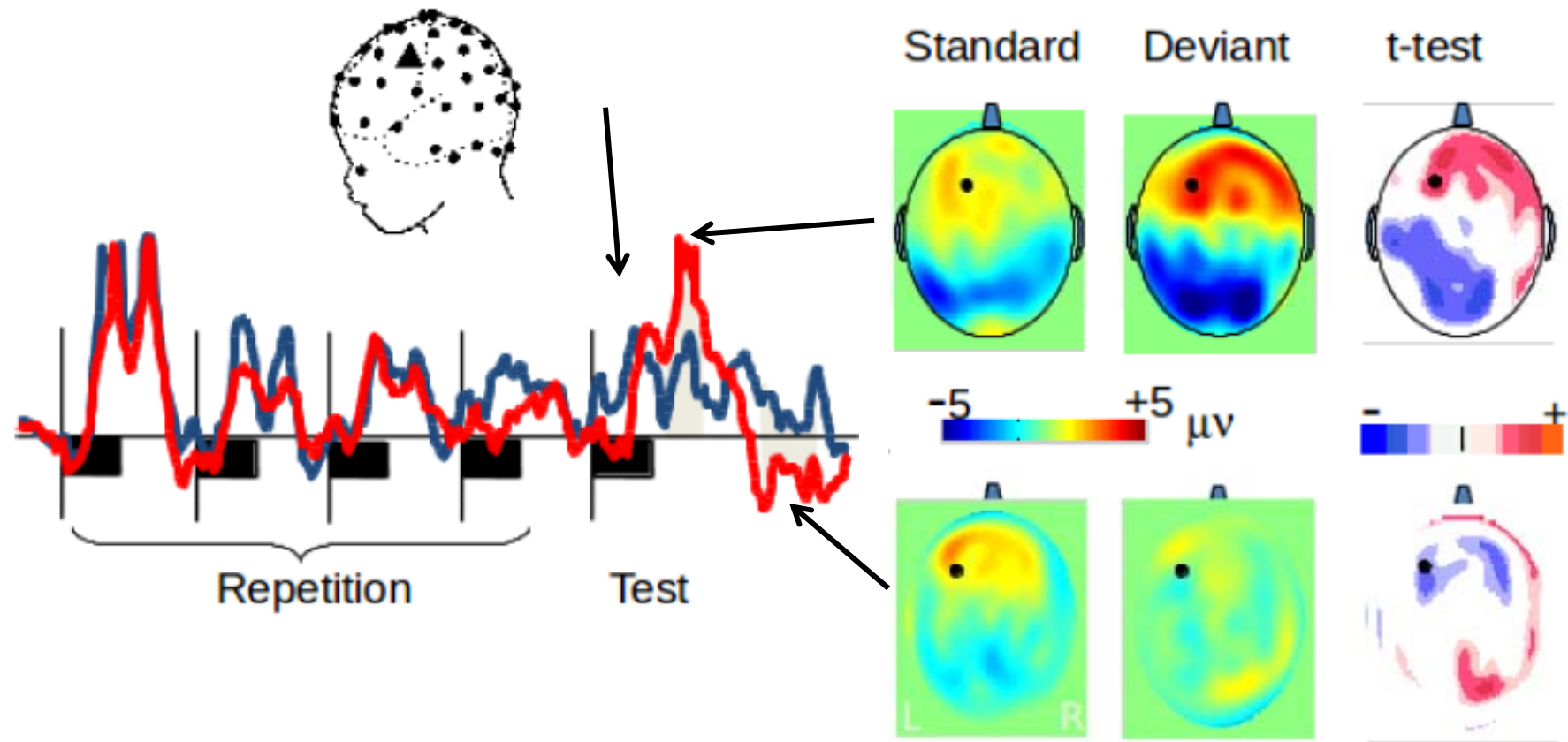
La cinquième syllabe peut être  
identique ou différente:  
ba ba ba ba **ba** ou ba ba ba ba **ga**

# La réponse à la déviation auditive dans le cerveau du bébé

Dehaene-Lambertz, G., & Dehaene, S. (1994). Speed and cerebral correlates of syllable discrimination in infants. *Nature*, 370, 292-295.

3 étapes successives de traitement:

- pic 1 (vers 200 ms): adaptation mais pas de réponse au changement de syllabe
- pic 2 (vers 400 ms): adaptation, et récupération lors du changement de syllabe
- négativité frontale à la nouveauté (700-1100 ms)

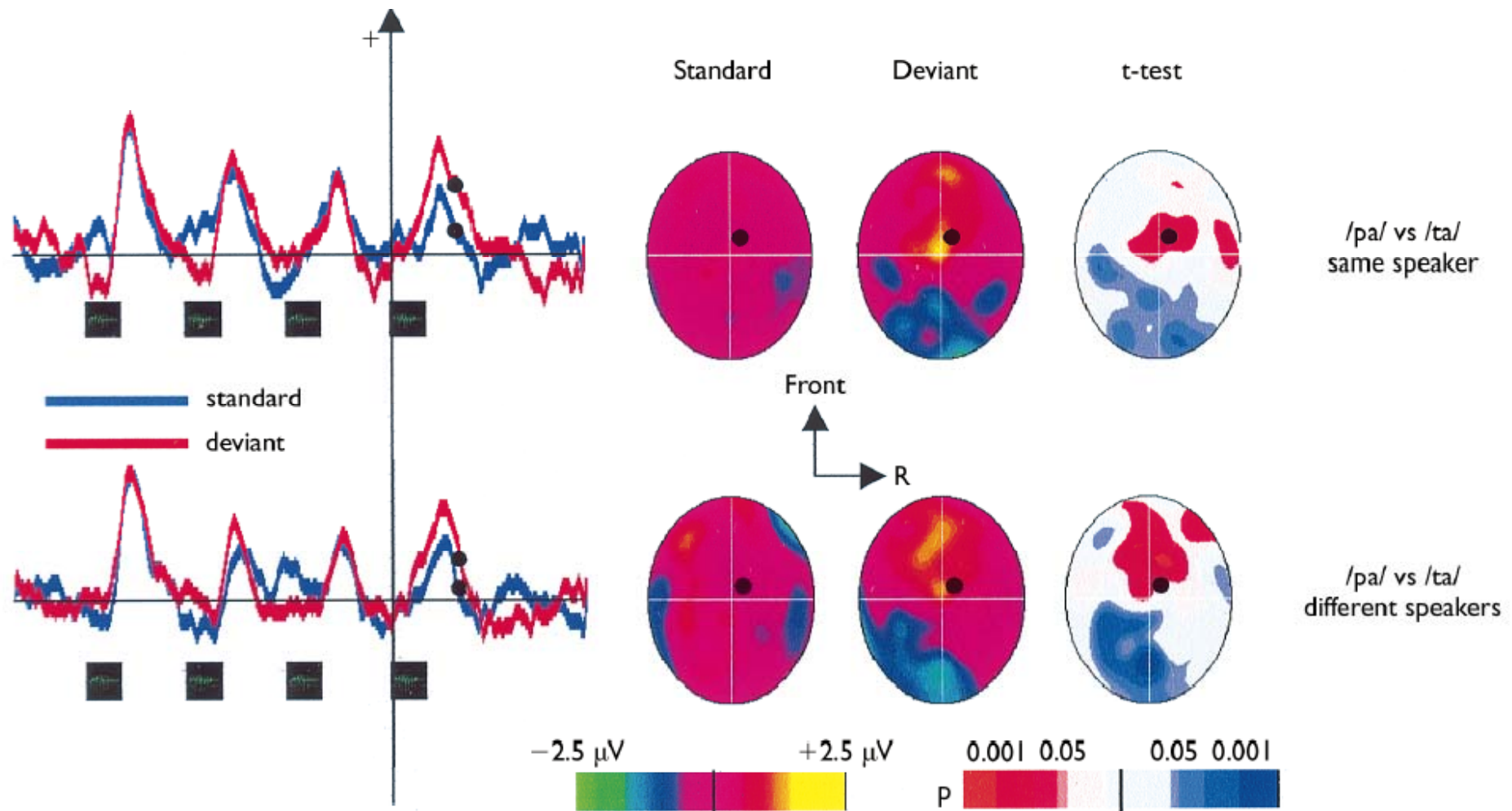




# Même les nouveau-nés endormis font des statistiques et détectent la nouveauté

Dehaene-Lambertz, G., & Pena, M. (2001). Electrophysiological evidence for automatic phonetic processing in neonates. *Neuroreport*, 12(14), 3155-3158.

Les bébés nouveau-nés *endormis* présentent une réponse au changement de syllabe – que la voix du locuteur change ou pas.



# Simple habituation, ou réel apprentissage de séquences temporelles?

Saffran, J. R., Aslin, R. N., & Newport, E. L. (1996). Statistical learning by 8-month-old infants. *Science*, 274(5294), 1926-1928.

tokibugikobagopilatipolutokibu  
 gopilatipolutokibugikobagopila  
 gikobatokibugopilatipolugikoba  
 tipolugikobatipolugopilatipolu  
 tokibugopilatipolutokibugopila  
 tipolutokibugopilagikobatipolu  
 tokibugopilagikobatipolugikoba  
 tipolugikobatipolutokibugikoba  
 gopilatipolugikobatokibugopila



Dans deux expériences, 24 enfants de 8 mois sont exposés pendant 2 minutes à des séquences de syllabes formant 4 mots de 3 syllabes (180 mots au total).

Ensuite on leur laisse écouter des chaînes de trois syllabes qui sont

- soit des « mots » de la séquence initiale
- soit des arrangements aléatoires (exp. 1)
- soit des « parties de mots » (exp. 2): la fin d'un mot et le début du suivant, par ex. bugiko

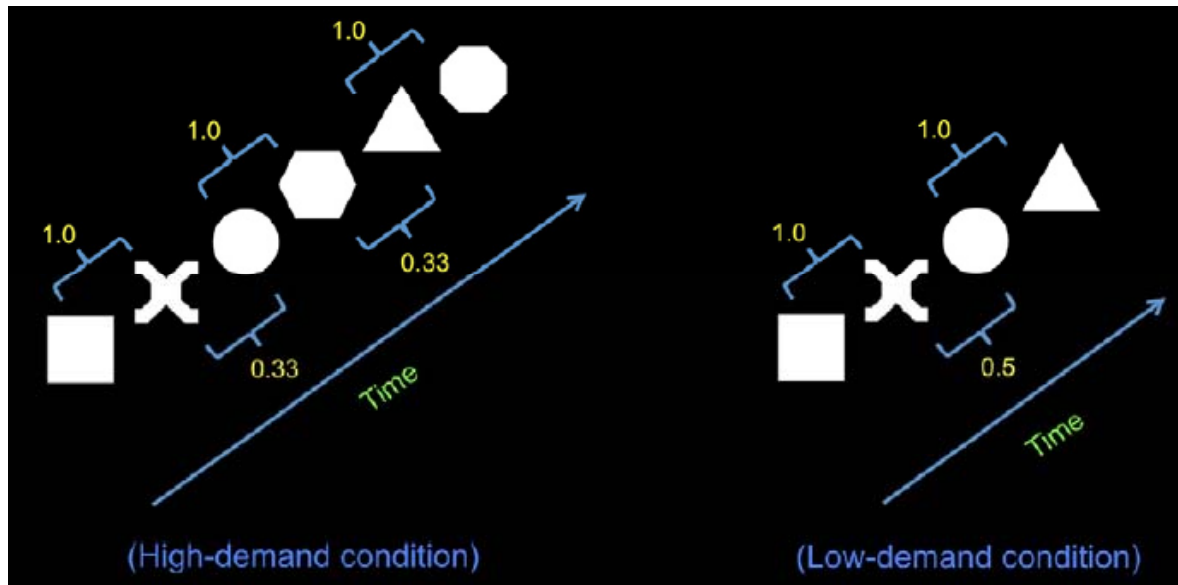
Le regard de l'enfant détermine combien de temps ces sons sont présentés.

L'enfant regarde plus longtemps les stimuli « nouveaux » (jamais ou rarement entendus)

Experiment	Mean listening times (s)		Matched-pairs <i>t</i> test
	Familiar items	Novel items	
1	7.97 (SE = 0.41)	8.85 (SE = 0.45)	$t(23) = 2.3, P < 0.04$
2	6.77 (SE = 0.44)	7.60 (SE = 0.42)	$t(23) = 2.4, P < 0.03$

# Même les nouveaux-nés font des statistiques et détectent la nouveauté

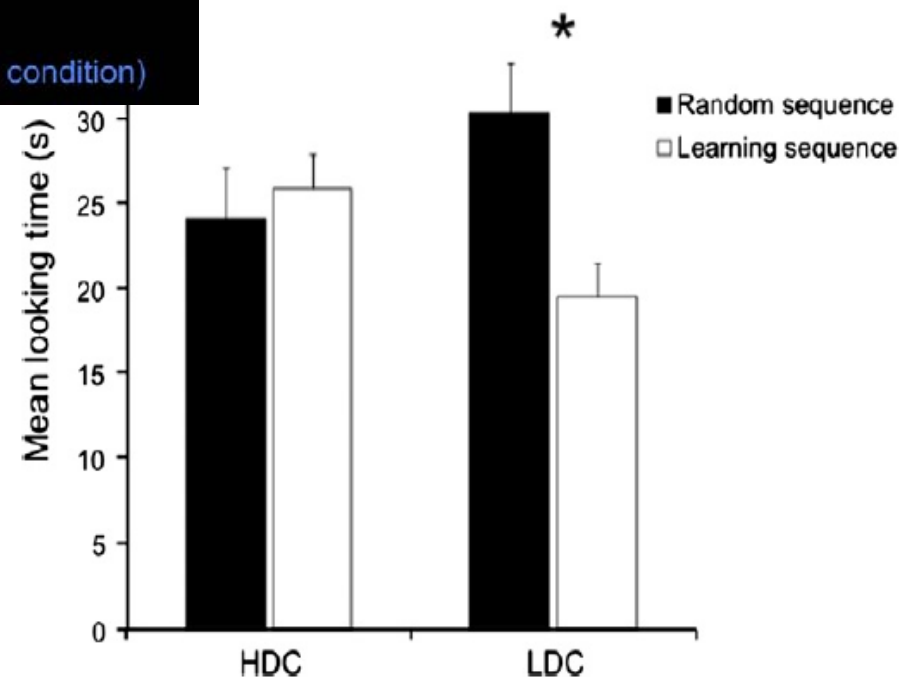
Bulf, H., Johnson, S. P., & Valenza, E. (2011). Visual statistical learning in the newborn infant. *Cognition*, 121(1), 127-132.



48 nouveau-nés de 1 à 3 jours sont testés avec une séquence visuelle arbitraire (une forme toutes les 2 secondes).

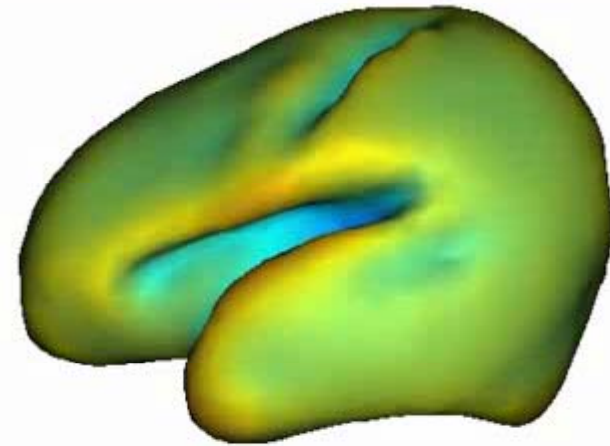
Après environ une minute d'habituation, ils regardent plus longtemps une séquence aléatoire que la séquence apprise

Ce comportement n'est toutefois observé que si la séquence est suffisamment simple (4 formes et non pas 6)



# Une réponse à la nouveauté auditive chez le prématuré de 31 semaines

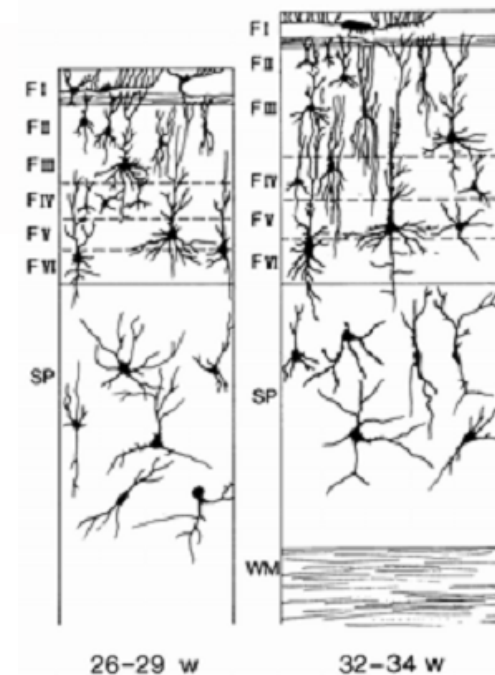
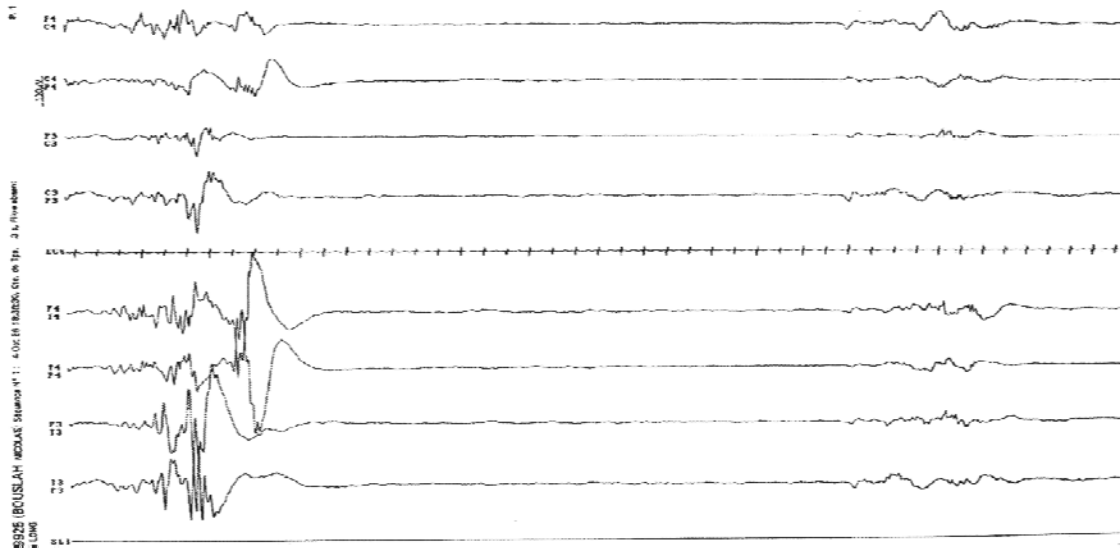
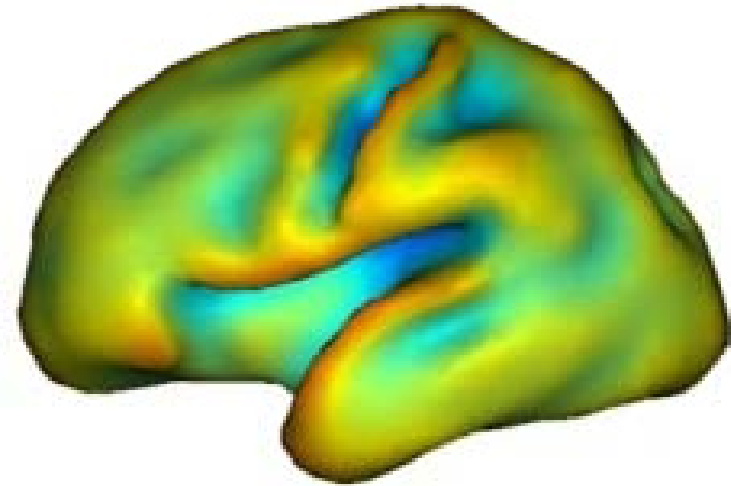
Mahmoudzadeh, M., Dehaene-Lambertz, G., Fournier, M., Kongolo, G., Godjil, S., Dubois, J., Grebe, R. & Wallois, F. (soumis). Syllabic discrimination in premature human infants prior to complete formation of cortical layers.



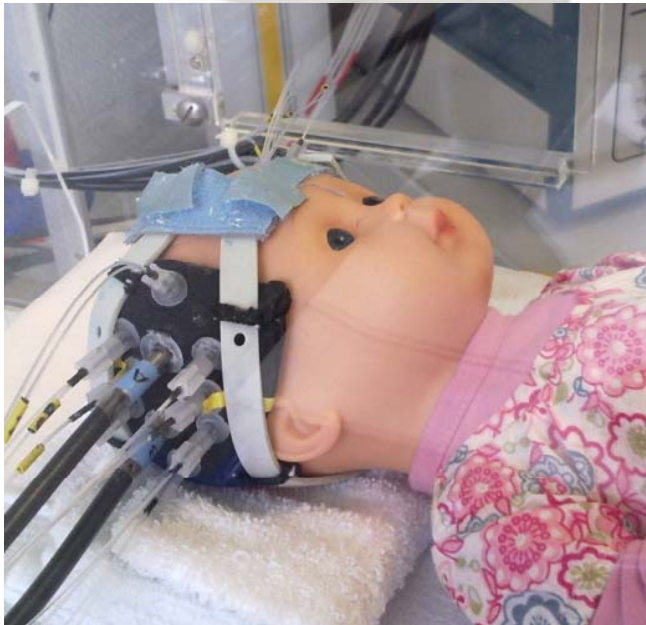
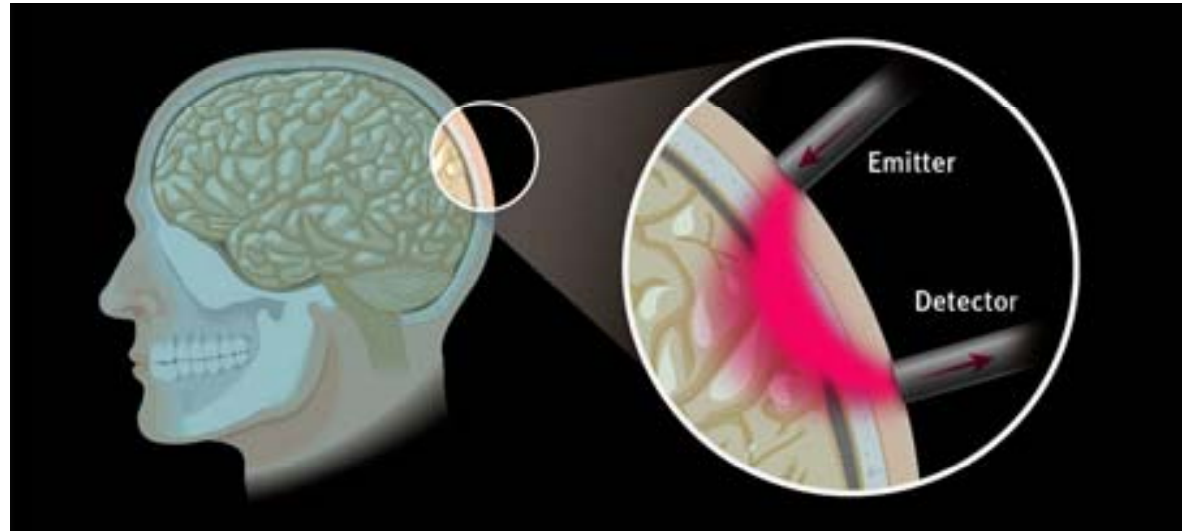
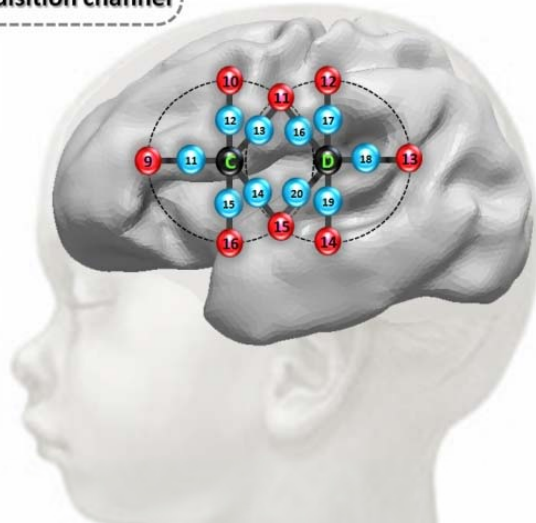


# Une réponse à la nouveauté auditive chez le prématuré de 31 semaines

Mahmoudzadeh, M., Dehaene-Lambertz, G., Fournier, M., Kongolo, G., Godjil, S., Dubois, J., Grebe, R. & Wallois, F. (soumis). Syllabic discrimination in premature human infants prior to complete formation of cortical layers.



# Utilisation de l'imagerie en proche infra-rouge pour étudier la discrimination chez le prématuré



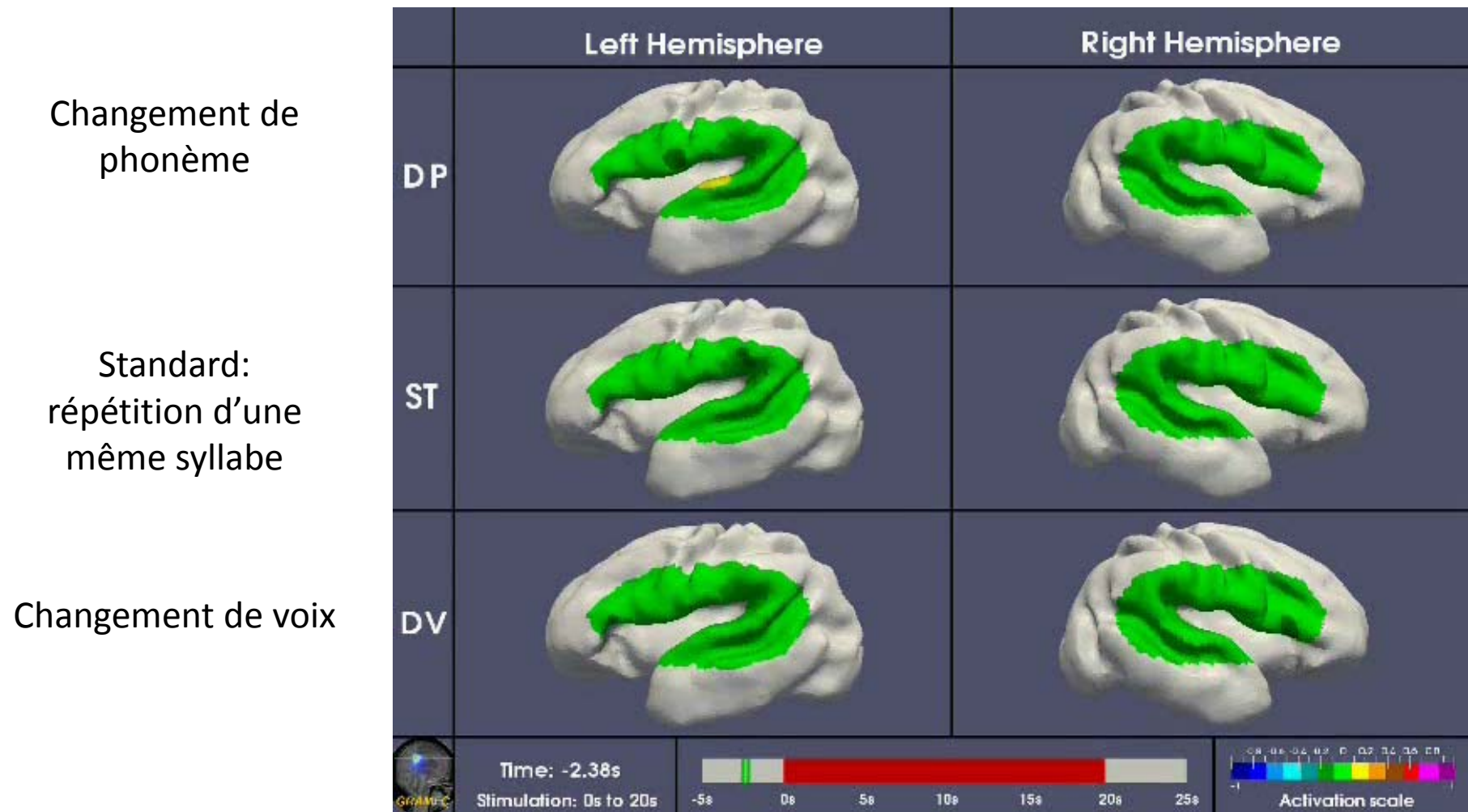
Dessin expérimental en blocs de 20 secondes, séparés de 40 secondes de silence.

- **blocs standards:** la même syllabe est répétée (ba ou ga)
- **blocs avec changement de voix**
- **blocs avec changement de phonème**

Mahmoudzadeh, M., Dehaene-Lambertz, G., Fournier, M., Kongolo, G., Godjil, S., Dubois, J., Grebe, R. & Wallois, F. (soumis). Syllabic discrimination in premature human infants prior to complete formation of cortical layers.

# Une réponse à la nouveauté auditive chez le prématuré de 31 semaines

Mahmoudzadeh, M., Dehaene-Lambertz, G., Fournier, M., Kongolo, G., Godjil, S., Dubois, J., Grebe, R. & Wallois, F. (soumis). Syllabic discrimination in premature human infants prior to complete formation of cortical layers.



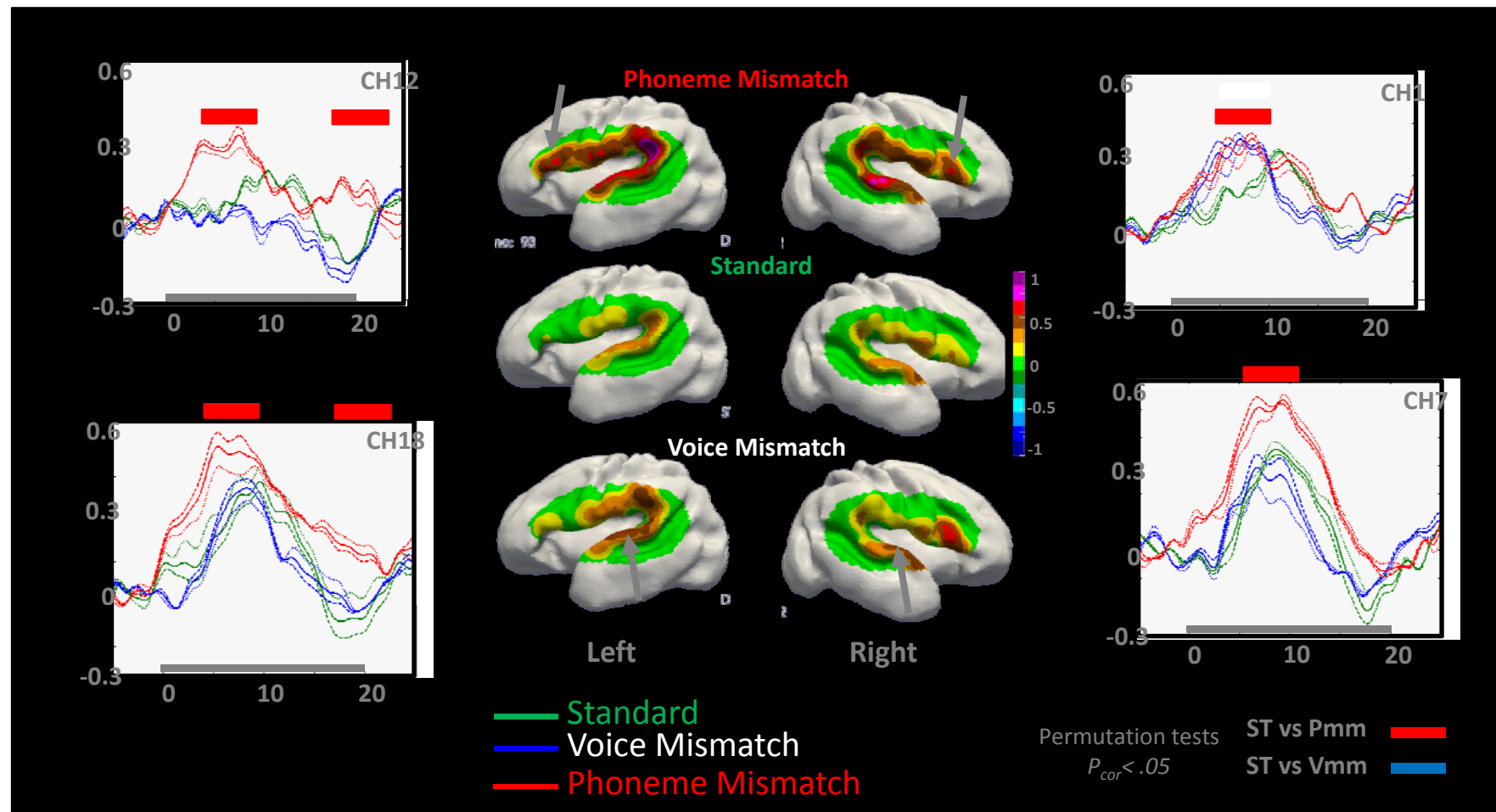
Concentration en hémoglobine oxygénée

# Une réponse à la nouveauté auditive chez le prématuré de 31 semaines

Mahmoudzadeh, M., Dehaene-Lambertz, G., Fournier, M., Kongolo, G., Godjil, S., Dubois, J., Grebe, R. & Wallois, F. (soumis). Syllabic discrimination in premature human infants prior to complete formation of cortical layers.

Changement de phonème

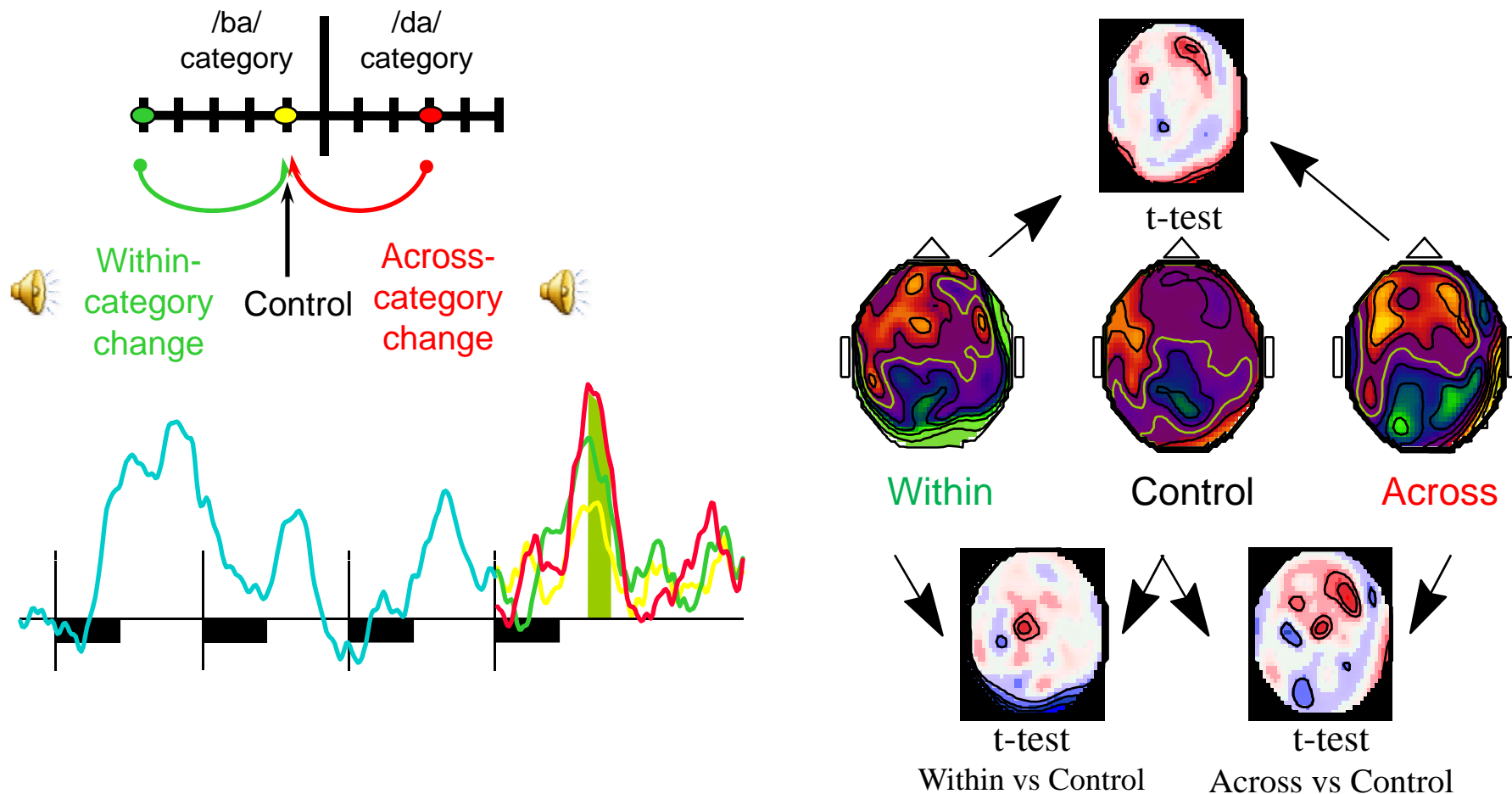
Réponse générique à la nouveauté





# Quel est le degré d'abstraction des connaissances du bébé? La réponse à la nouveauté phonologique est catégorielle chez l'enfant de trois mois

Dehaene-Lambertz, G., & Baillet, S. (1998). A phonological representation in the infant brain. *Neuroreport*, 9(8), 1885-1888.





# Quel est le degré d'abstraction des connaissances du bébé?

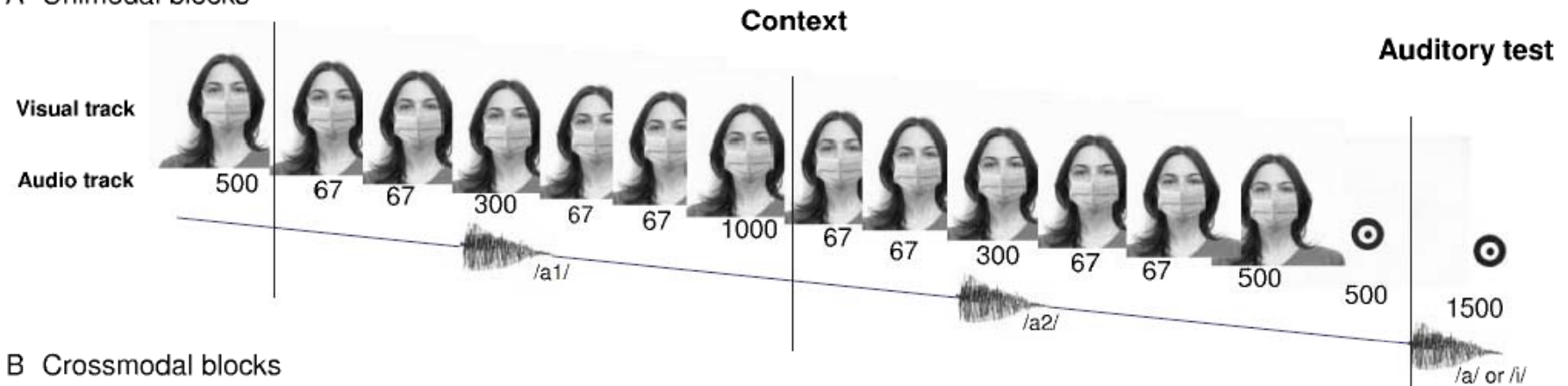
## La réponse à la nouveauté reflète une intégration multimodale

Bristow, D., Dehaene-Lambertz, G., Mattout, J., Soares, C., Gliga, T., Baillet, S., et al. (2009). Hearing faces: how the infant brain matches the face it sees with the speech it hears. *J Cogn Neurosci*, 21(5), 905-921.

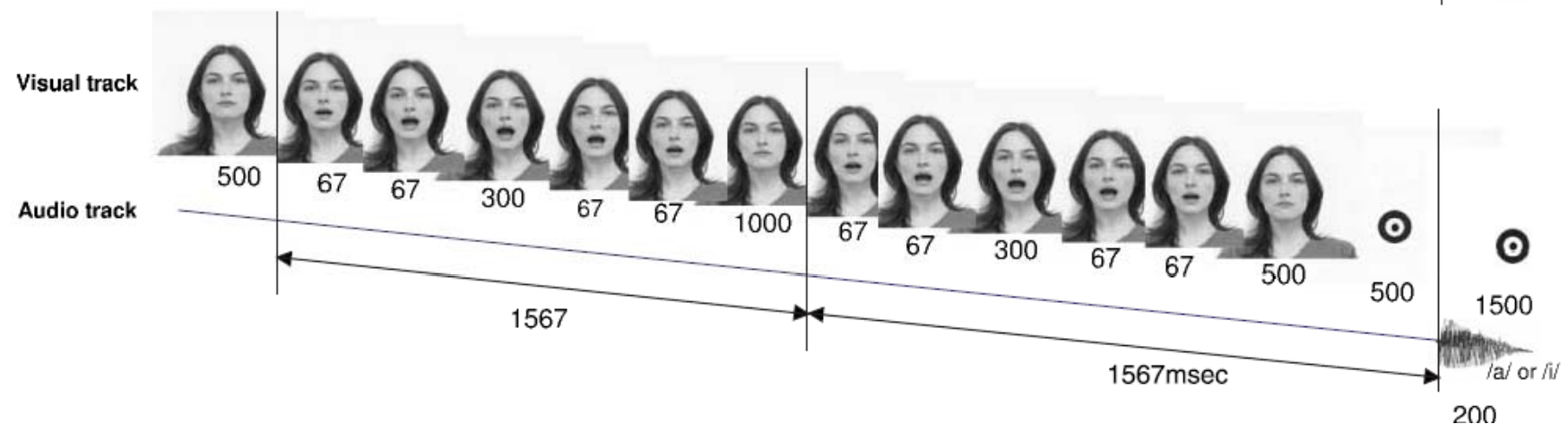
Le bébé de 10 semaines est-il capable de détecter la congruence entre une voyelle et le mouvement correspondant de la bouche?

Présentation de blocs de 16 essais, soit uni-modaux, soit cross-modaux.

A Unimodal blocks



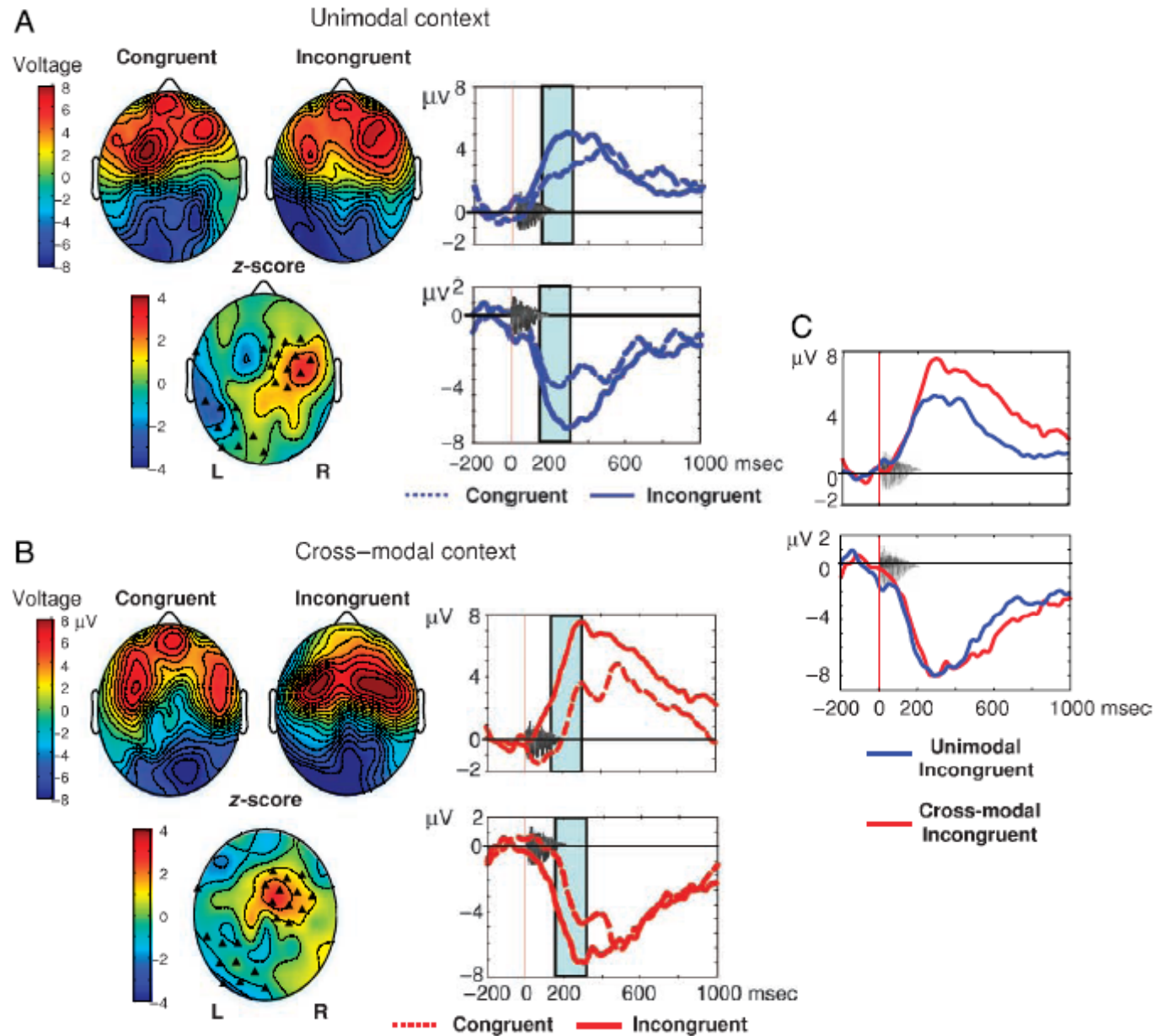
B Crossmodal blocks



Bristow, D., Dehaene-Lambertz, G., Mattout, J., Soares, C., Gliga, T., Baillet, S., et al. (2009). Hearing faces: how the infant brain matches the face it sees with the speech it hears. *J Cogn Neurosci*, 21(5), 905-921.

Une réponse très similaire à la nouveauté est observée:  
 - quand le son dévie des sons précédents  
 - et quand le son dévie de la prédiction que l'on peut faire sur la base des entrées visuelles

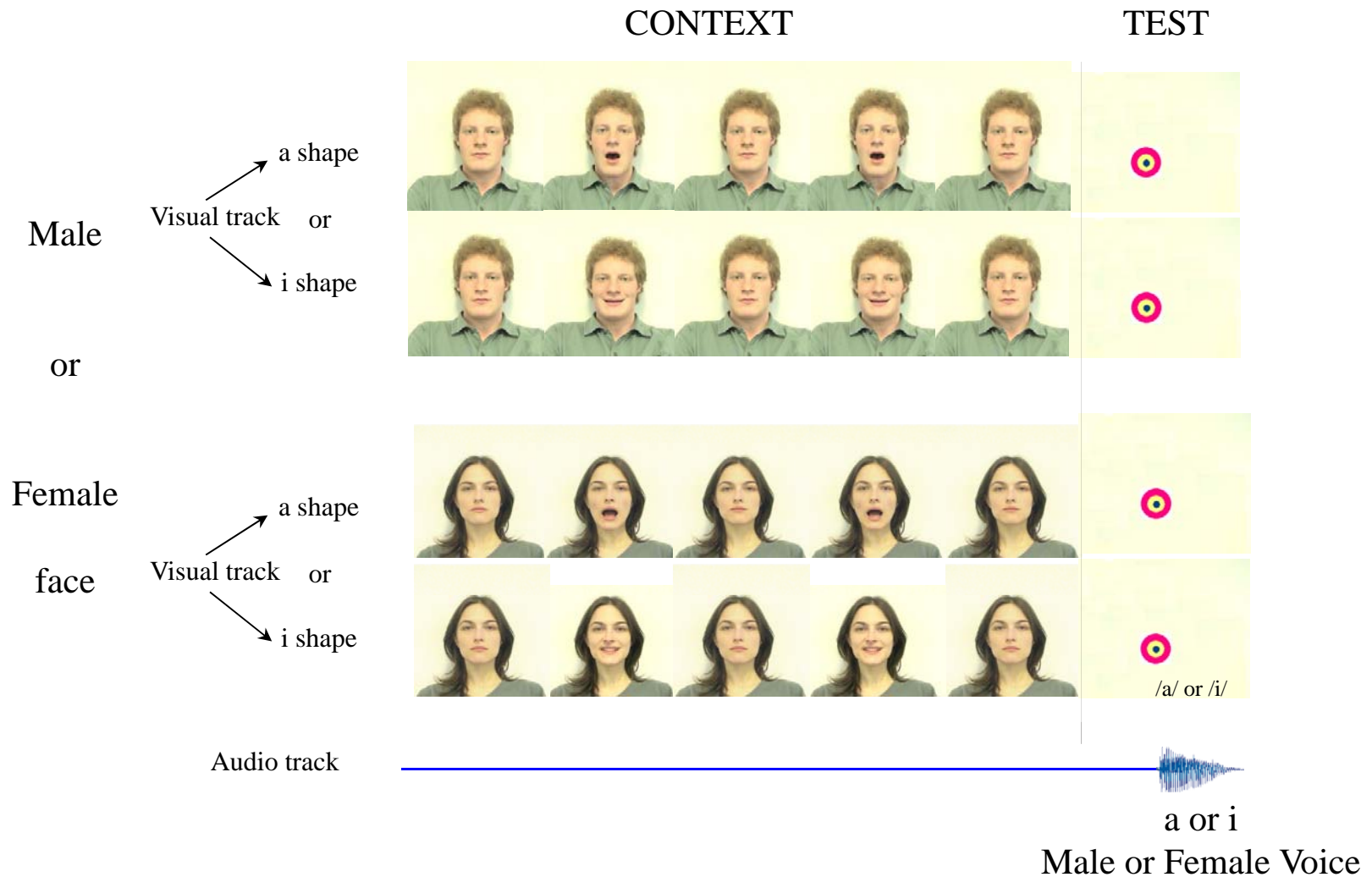
La partie négative de la réponse est latéralisée à l'hémisphère gauche.



# Le cerveau du bébé distingue les changements de voyelle et de voix

Bristow, D., Dehaene-Lambertz, G., Mattout, J., Soares, C., Gliga, T., Baillet, S., et al. (2009). Hearing faces: how the infant brain matches the face it sees with the speech it hears. *J Cogn Neurosci*, 21(5), 905-921.

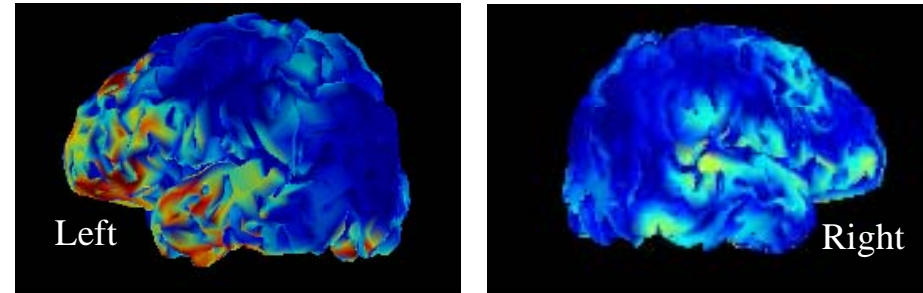
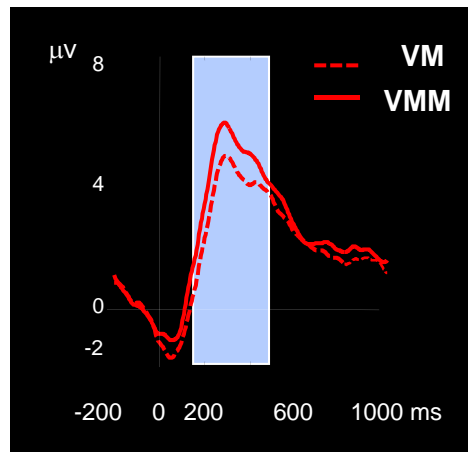
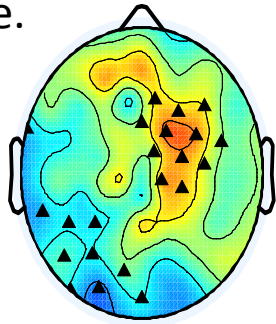
Expérience 2. Réplication avec uniquement des essais cross-modaux, en contrastant changement de voyelle et changement de voix.



# Le cerveau du bébé distingue les changements de voyelle et de voix

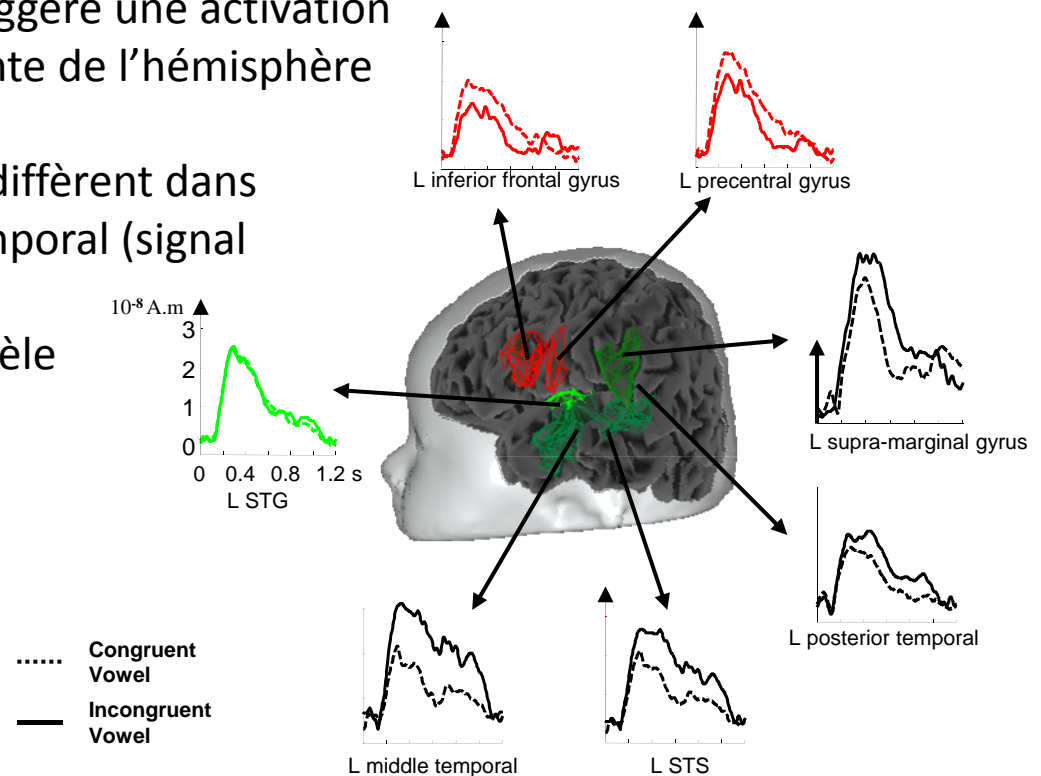
Bristow, D., Dehaene-Lambertz, G., Mattout, J., Soares, C., Gliga, T., Baillet, S., et al. (2009). Hearing faces: how the infant brain matches the face it sees with the speech it hears. *J Cogn Neurosci*, 21(5), 905-921.

Le changement de voyelle évoque, à nouveau une négativité latéralisée à gauche.



La modélisation des sources corticales suggère une activation prépondérante de l'hémisphère gauche.

Les signaux diffèrent dans le cortex temporal (signal d'erreur?) et frontal (modèle interne?)



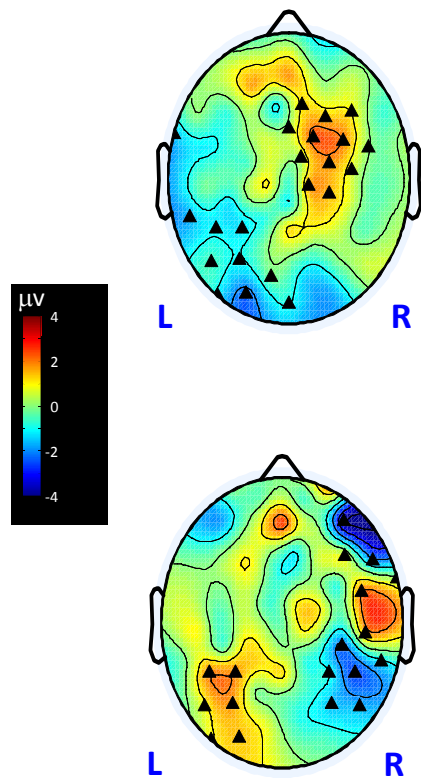


# Le cerveau du bébé distingue les changements de voyelle et de voix

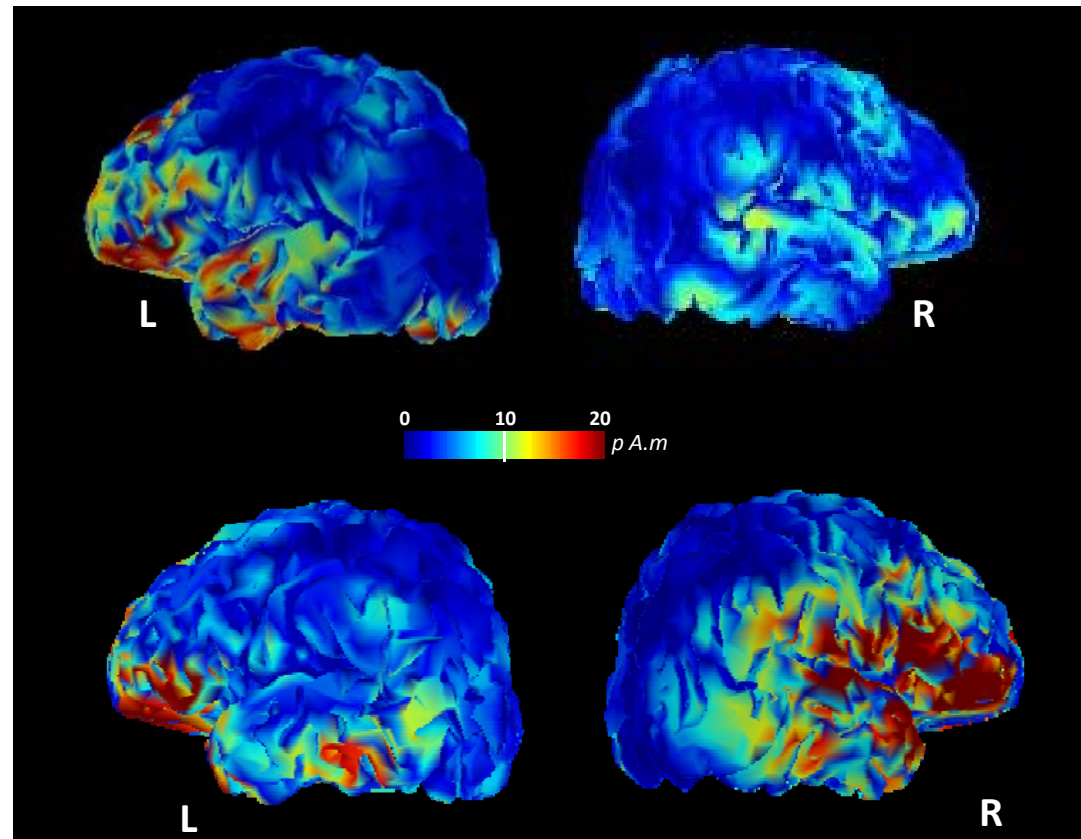
Bristow, D., Dehaene-Lambertz, G., Mattout, J., Soares, C., Gliga, T., Baillet, S., et al. (2009). Hearing faces: how the infant brain matches the face it sees with the speech it hears. *J Cogn Neurosci*, 21(5), 905-921.

Les réponses corticales aux changements de voyelle et de voix sont bien distinctes:  
Des régions corticales distinctes acquièrent des modèles internes de ces différents paramètres.

Topographies  
Incongruent-Congruent  
(150-316 ms)



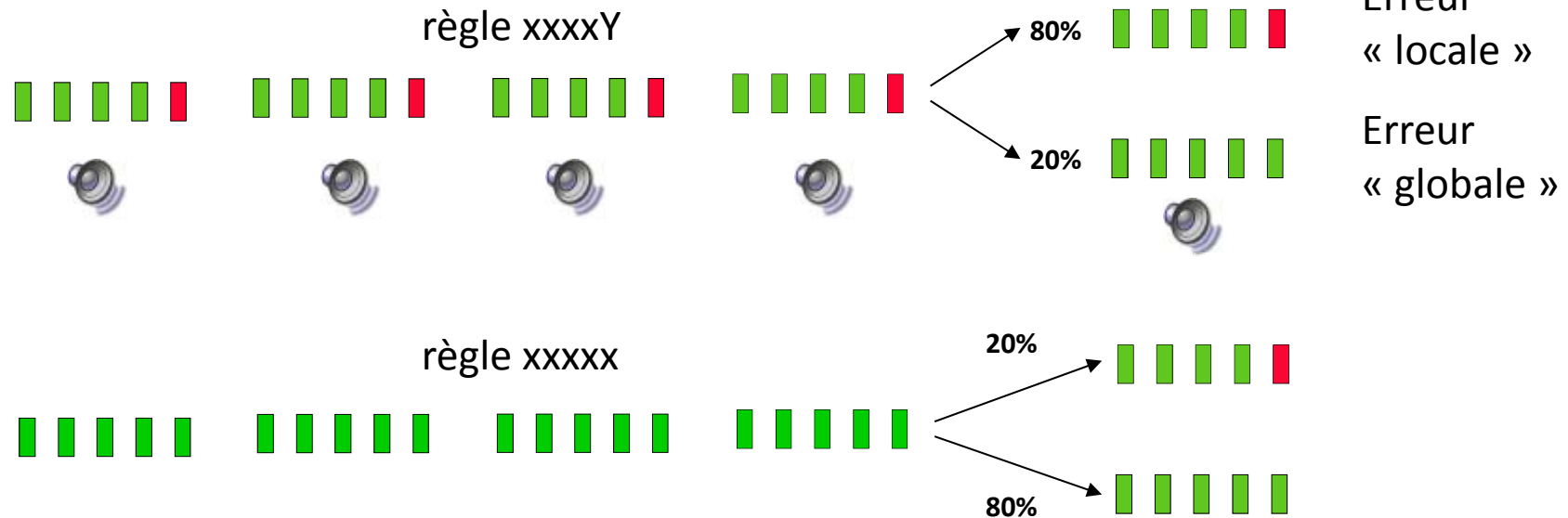
Sources corticales inférées





# Une hiérarchie de prédictions dans le cortex

Bekinschtein, T. A., Dehaene, S., Rohaut, B., Tadel, F., Cohen, L., & Naccache, L. (2009). Neural signature of the conscious processing of auditory regularities. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 106(5), 1672-1677.



La présentation d'une note rare, au sein d'une séquence répétée, évoque une MMN.

Que se passerait-il si la séquence toute entière devenait prévisible?

La MMN persiste – elle reflète un système de prédiction local et aveugle.

Mais une seconde réponse à la nouveauté, la P3b, disparaît – c'est à présent le stimulus *monotone* qui évoque la P3b.

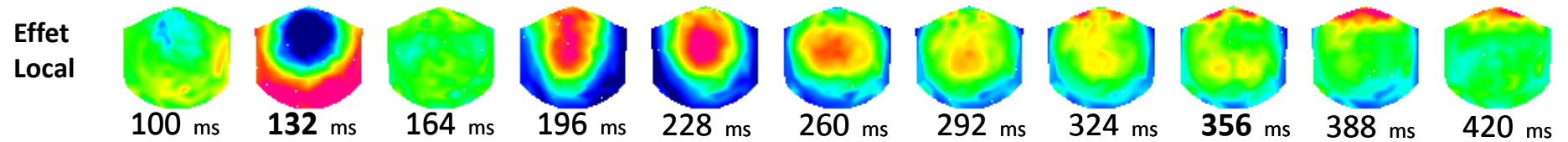
→ Il existe une hiérarchie de prédictions dans le cortex.

→ La P3b pourrait refléter le niveau de la prédiction consciente.

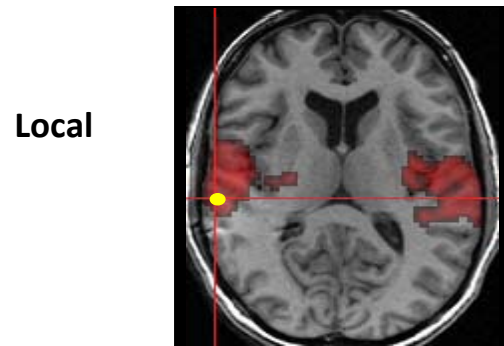
# Dissociation entre déviants locaux et globaux

Bekinschtein, Dehaene, Rohaut, Tadel, Cohen & Naccache, PNAS 2009

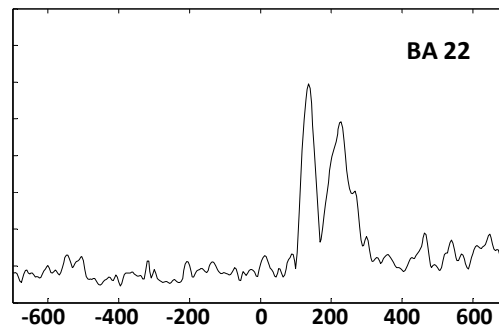
Les déviants locaux et globaux évoquent des activités cérébrales très différentes:



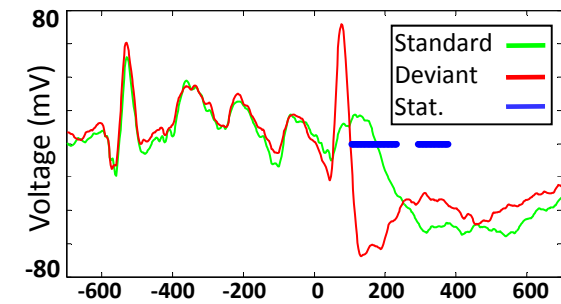
fMRI



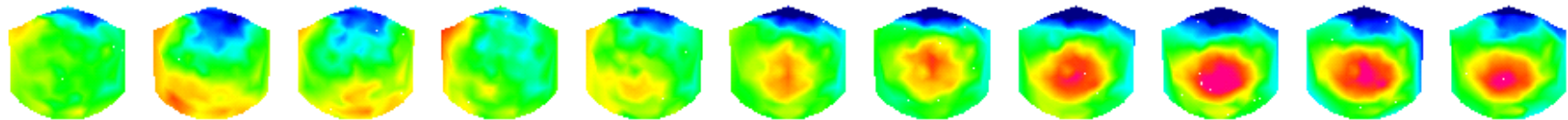
ERP source analysis



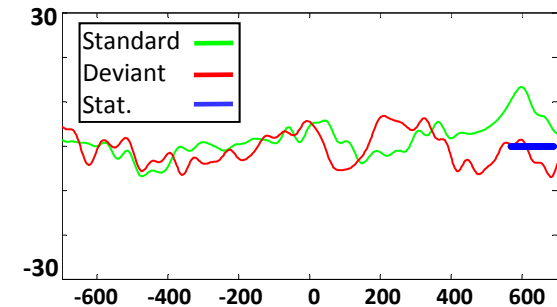
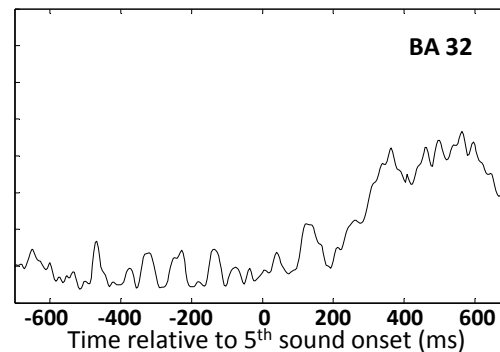
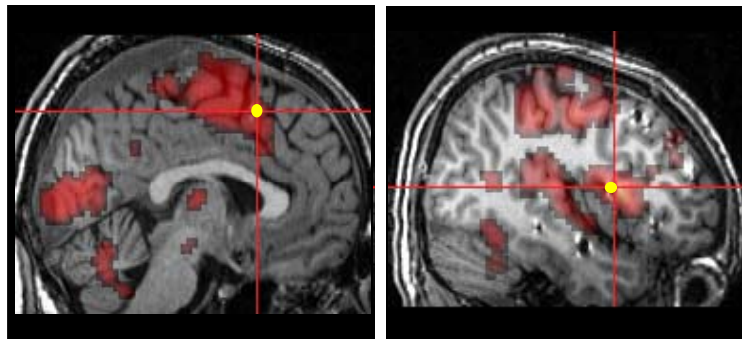
Intracranial recordings



Effet Global



Global



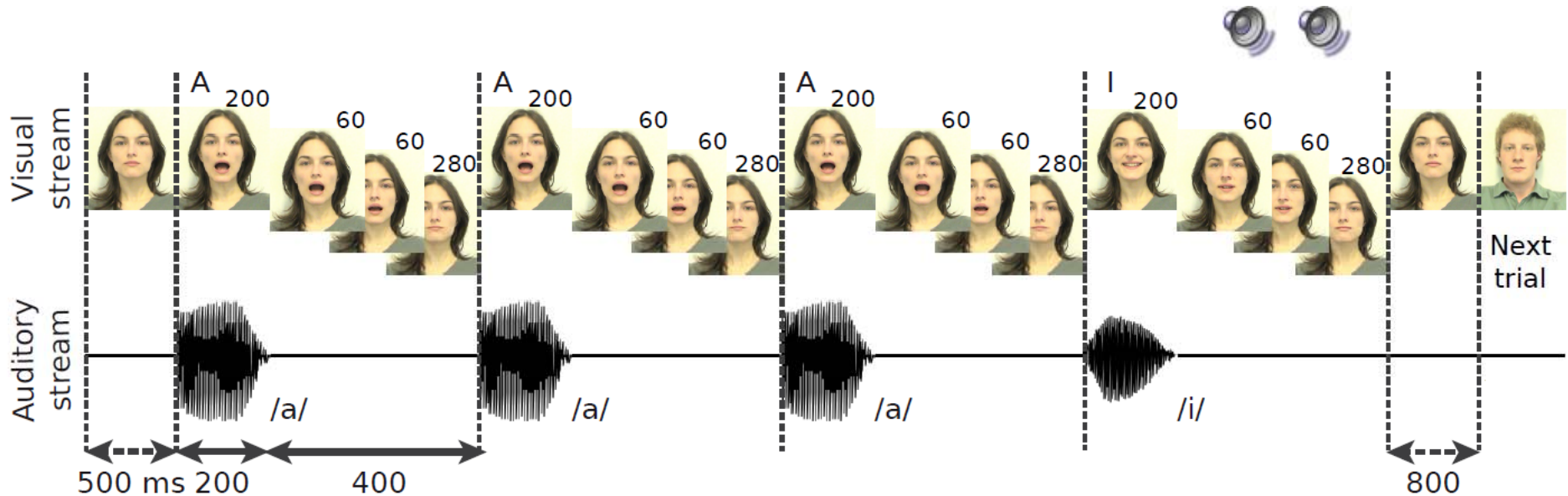


# La hiérarchie locale-globale existe-t-elle chez le bébé?

Anahita Bassirat, Stanislas Dehaene, Ghislaine Dehaene-Lambertz, *article soumis*

29 bébés âgés entre 11 et 15 semaines.  
 Deux types de blocs: xxxY ou xxxX  
 25% de deviants (xxxx ou xxxY)

Learning phase	Test phase
<p>xxxx rule (aaaa or iiii)</p> <p>[ x x x x ] Local standard                      100%                      (= 15 items)</p>	<p>[ x x x x ] Local standard                      75%                      (= 45 items)</p> <p>[ x x x Y ] Local deviant                      25%                      (= 15 items)</p>
<p>xxxY rule (aaai or iiaa)</p> <p>[ x x x Y ] Local deviant                      100%                      (= 15 items)</p>	<p>[ x x x Y ] Local deviant                      75%                      (= 45 items)</p> <p>[ x x x x ] Local standard                      25%                      (= 15 items)</p>

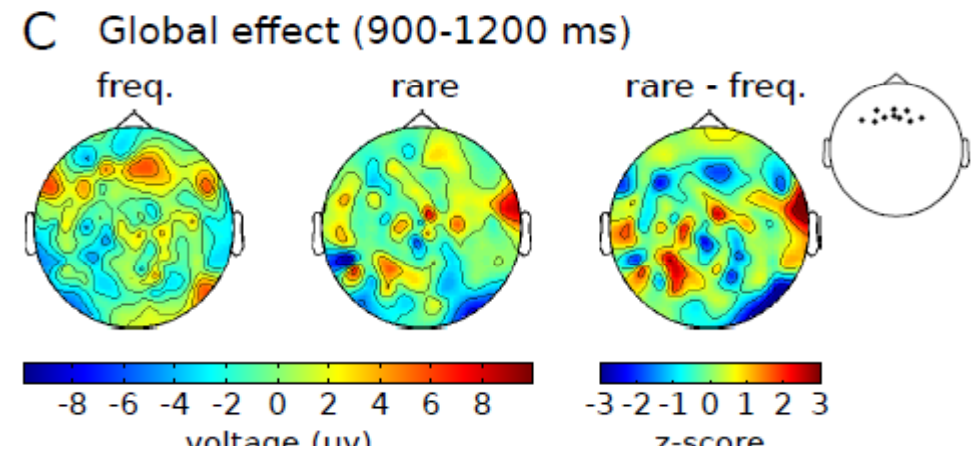
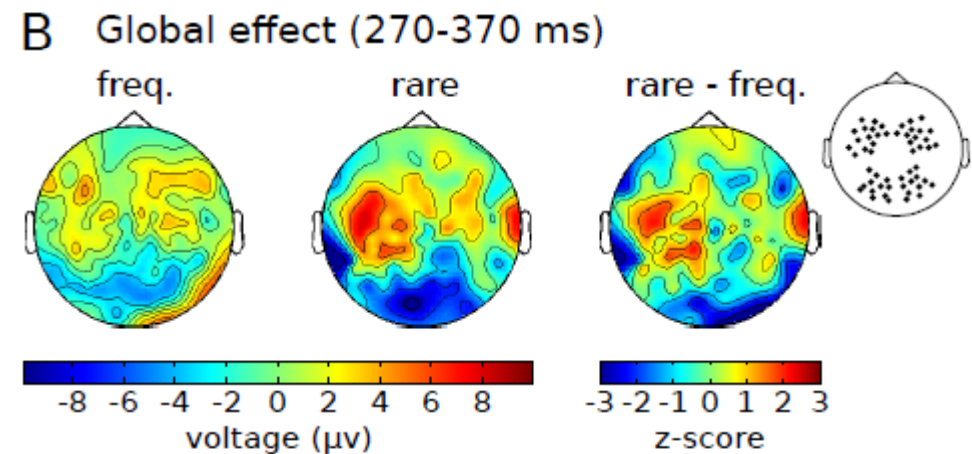
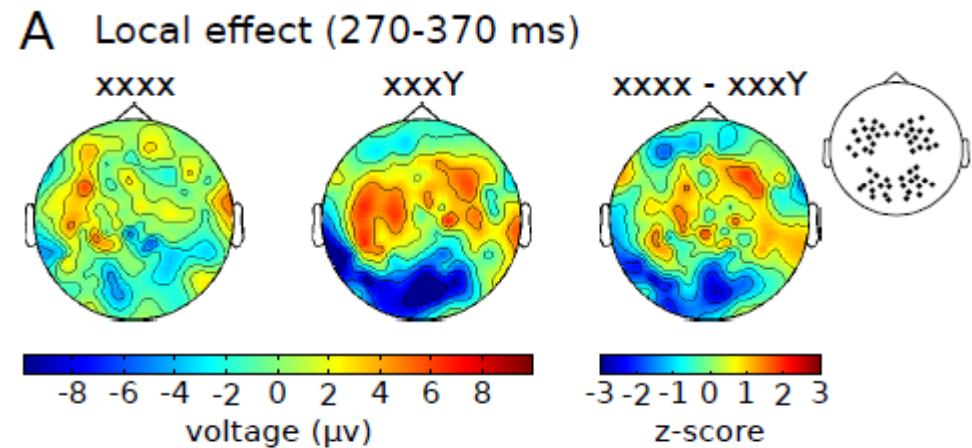


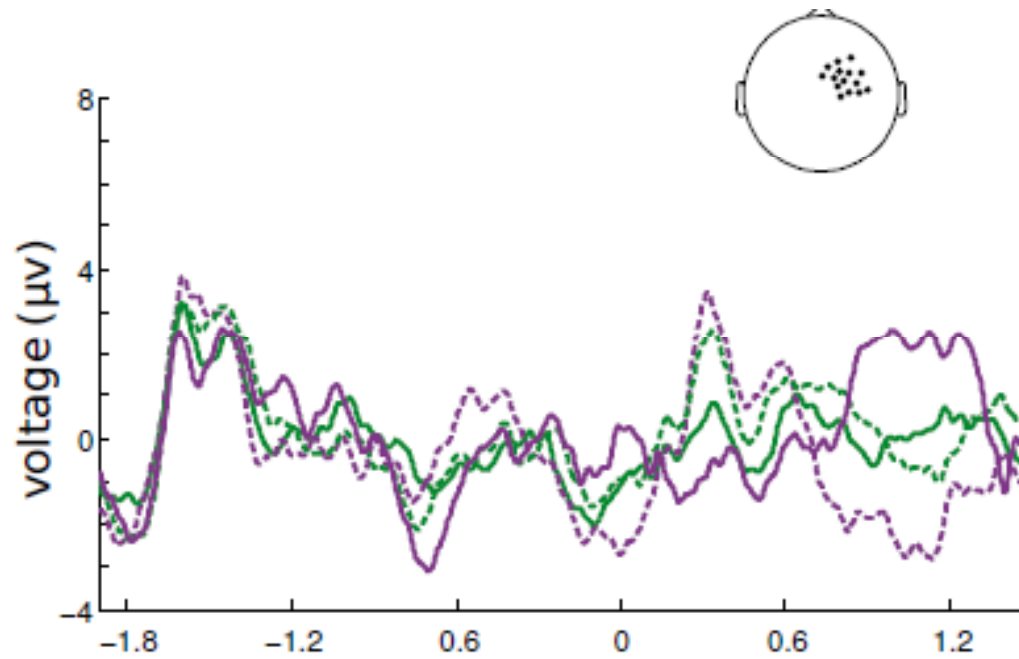
# Les réponses locales et globales existent chez le bébé

Anahita Bassirat, Stanislas Dehaene, Ghislaine Dehaene-Lambertz, *article soumis*

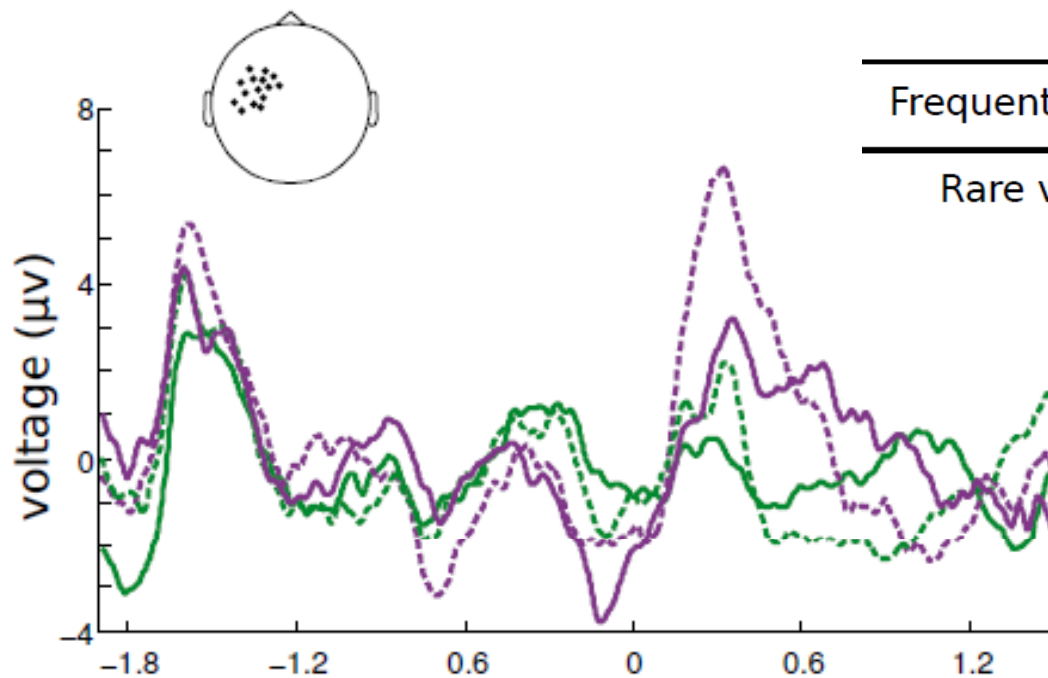
Le changement local évoque une réponse bilatérale, typique de la réponse à un son inattendu.

Le changement global évoque -d'abord une réponse relativement précoce, modulation de la réponse précédente, mais latéralisée à gauche -puis une négativité frontale très tardive.





Réponse aux déviants locaux sur les électrodes antérieures droites.



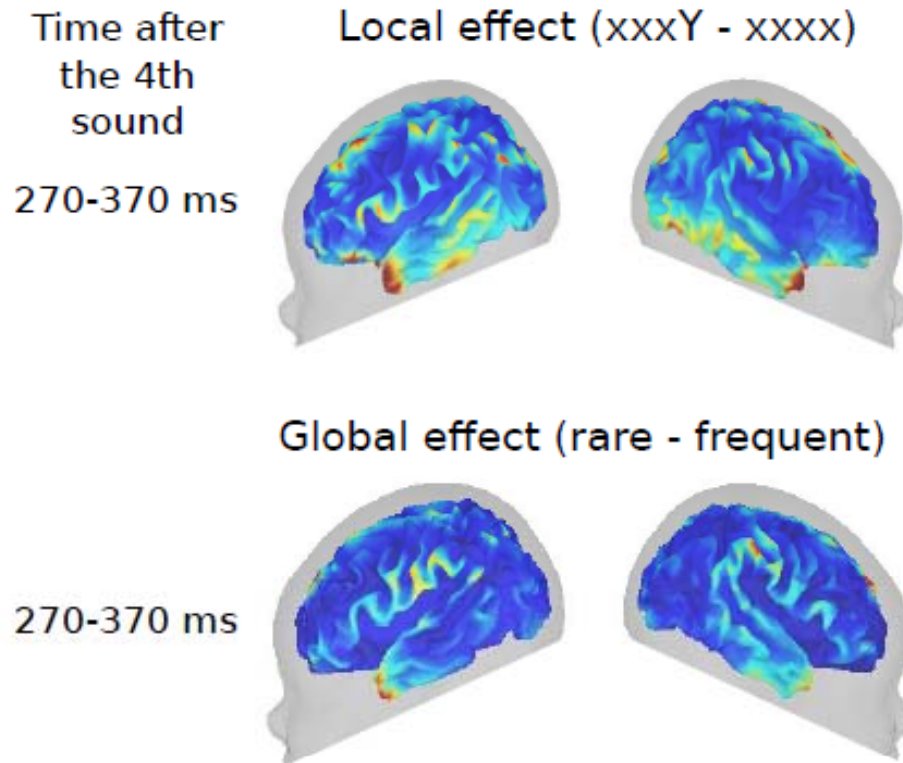
	xxxx rule	xxxY rule
Frequent sequence	<u>xxxx</u>	<u>xxxY</u>
Rare violation	<u>xxxY</u>	<u>xxxx</u>

Réponse aux déviants globaux sur les électrodes antérieures gauches - noter la réponse plus lente et initialement moins ample pour les déviants « xxxx ».



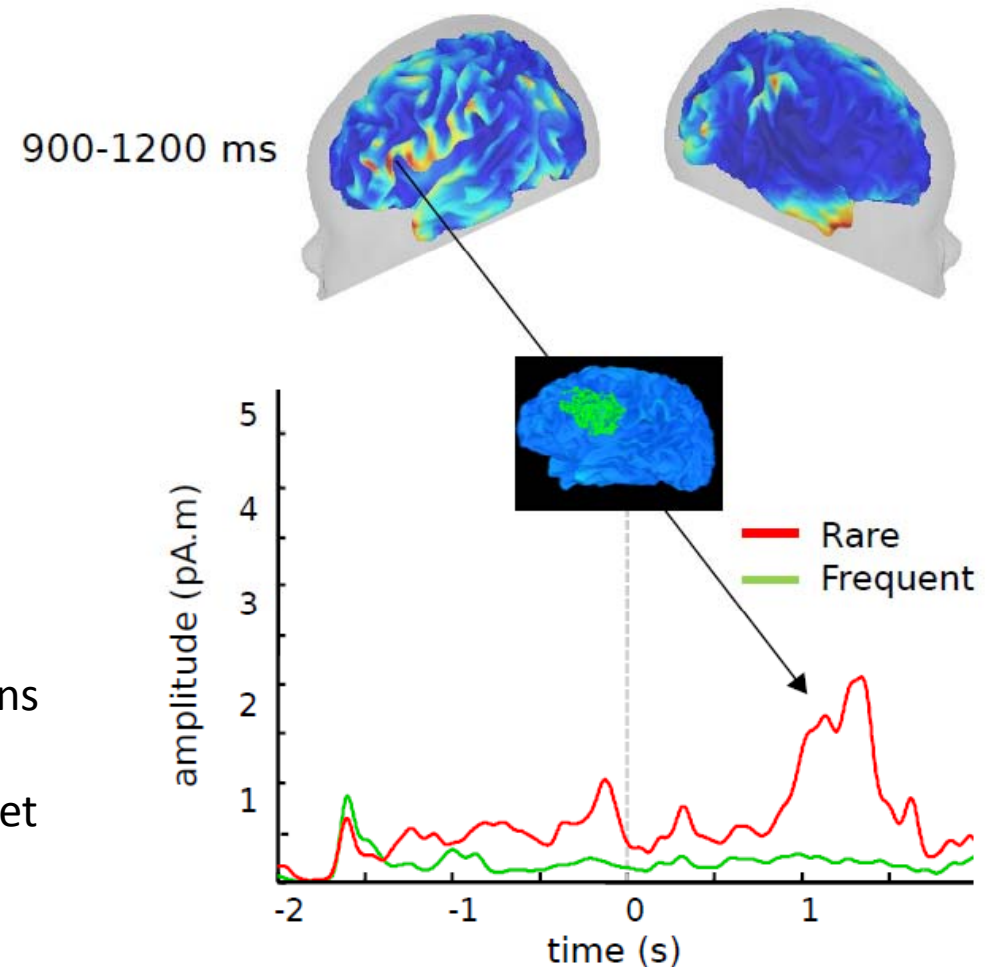
# Une hiérarchie de réponses à la nouveauté chez le bébé de 3 mois

Anahita Bassirat, Stanislas Dehaene, Ghislaine Dehaene-Lambertz, *article soumis*



Le cortex temporal bilatéral et les régions voisines (cortex pariétal inférieur?) répondent aux déviants locaux et à l'effet global précoce.

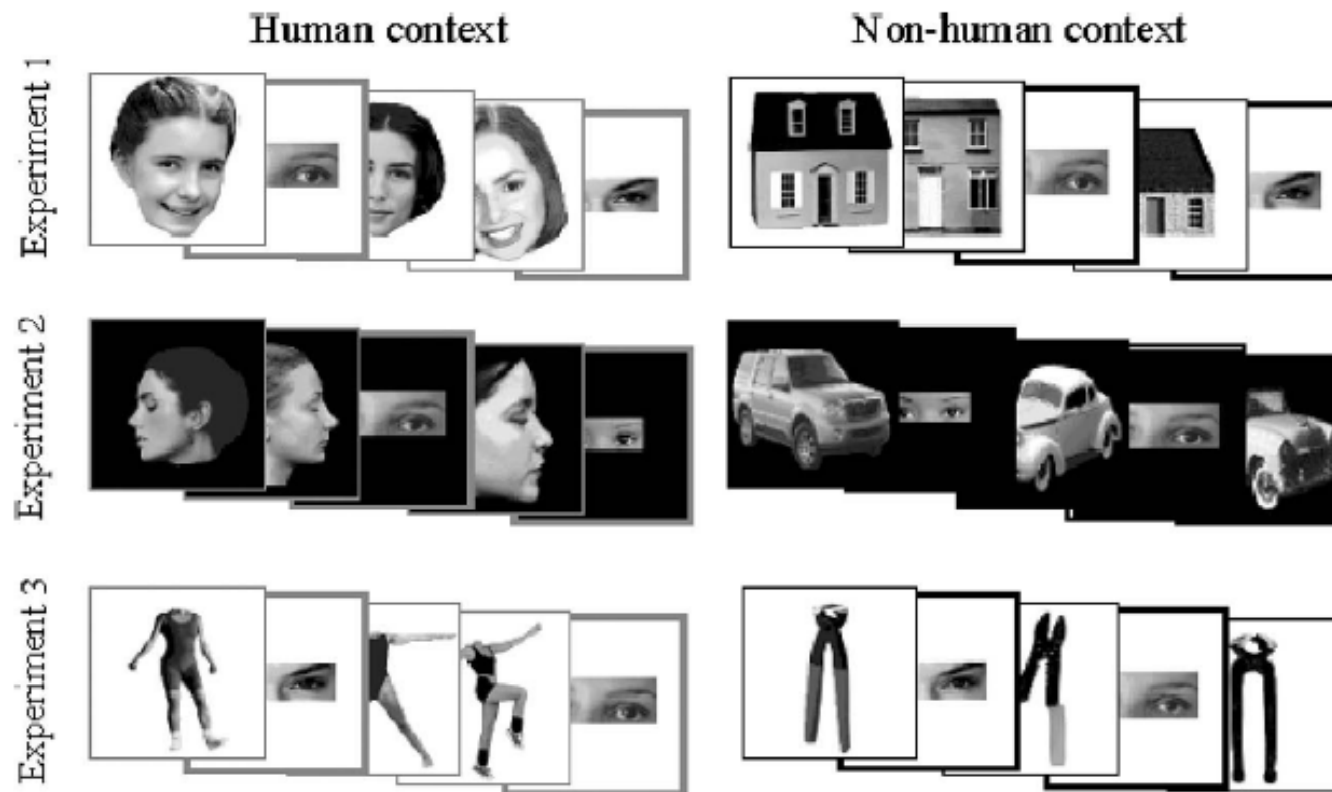
Les réponses tardives sont dominées par un effet global issu principalement du cortex frontal.



# L'apprentissage d'une représentation invariante des visages

Gliga, T., & Dehaene-Lambertz, G. (2007). Development of a view-invariant representation of the human head. *Cognition*, 102(2), 261-288.

Quelle représentation les bébés de trois mois ont-ils du corps humain et du visage?  
« Savent » ils que les yeux sont une partie du visage?  
Idée élégante: examiner si la présentation de visages ou de corps humains comme contexte, conduit à une habituation des réponses cérébrales aux yeux.



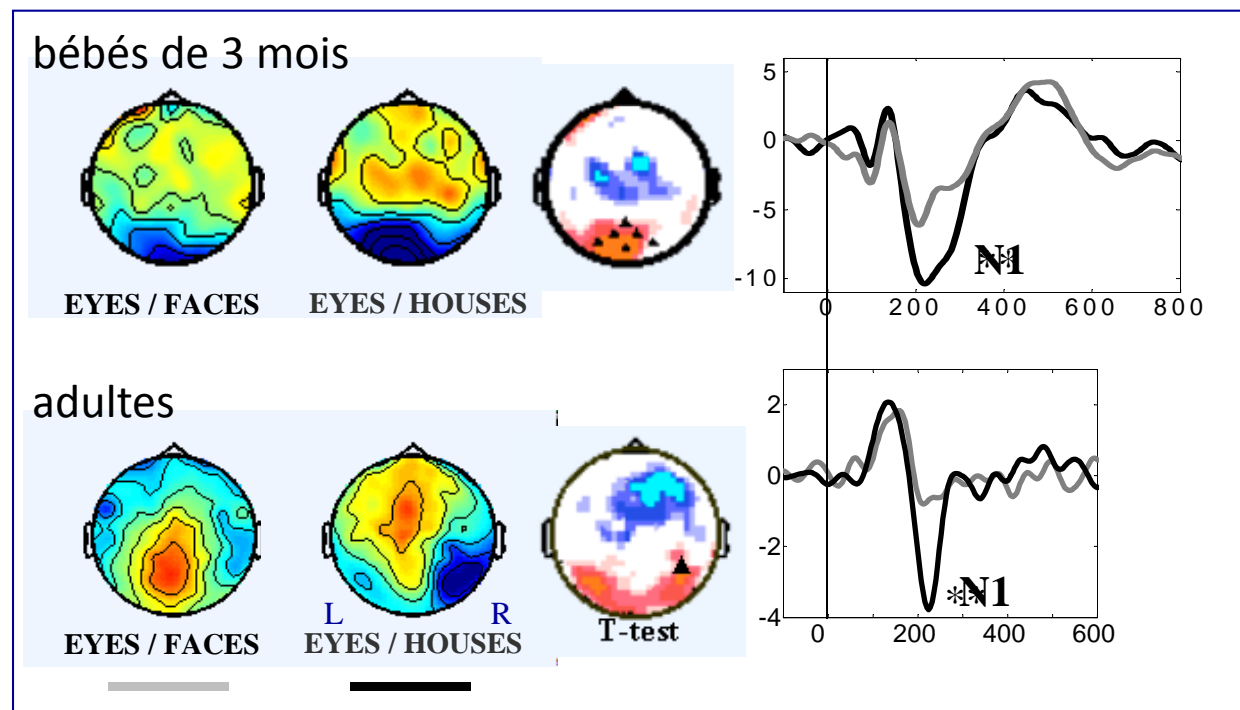
# L'apprentissage d'une représentation invariante des visages

Gliga, T., & Dehaene-Lambertz, G. (2007). Development of a view-invariant representation of the human head. *Cognition*, 102(2), 261-288.

Expérience 1. Contexte = visages de face, ou maisons

Les réponses aux yeux sont considérablement habituées lorsque ces images sont présentées dans le contexte d'un bloc de visages.

Une habituation similaire, quoique un peu plus faible, est observée lorsque le visage est vu de face, mais avec les yeux masqués (expérience 5).



# L'apprentissage d'une représentation invariante des visages

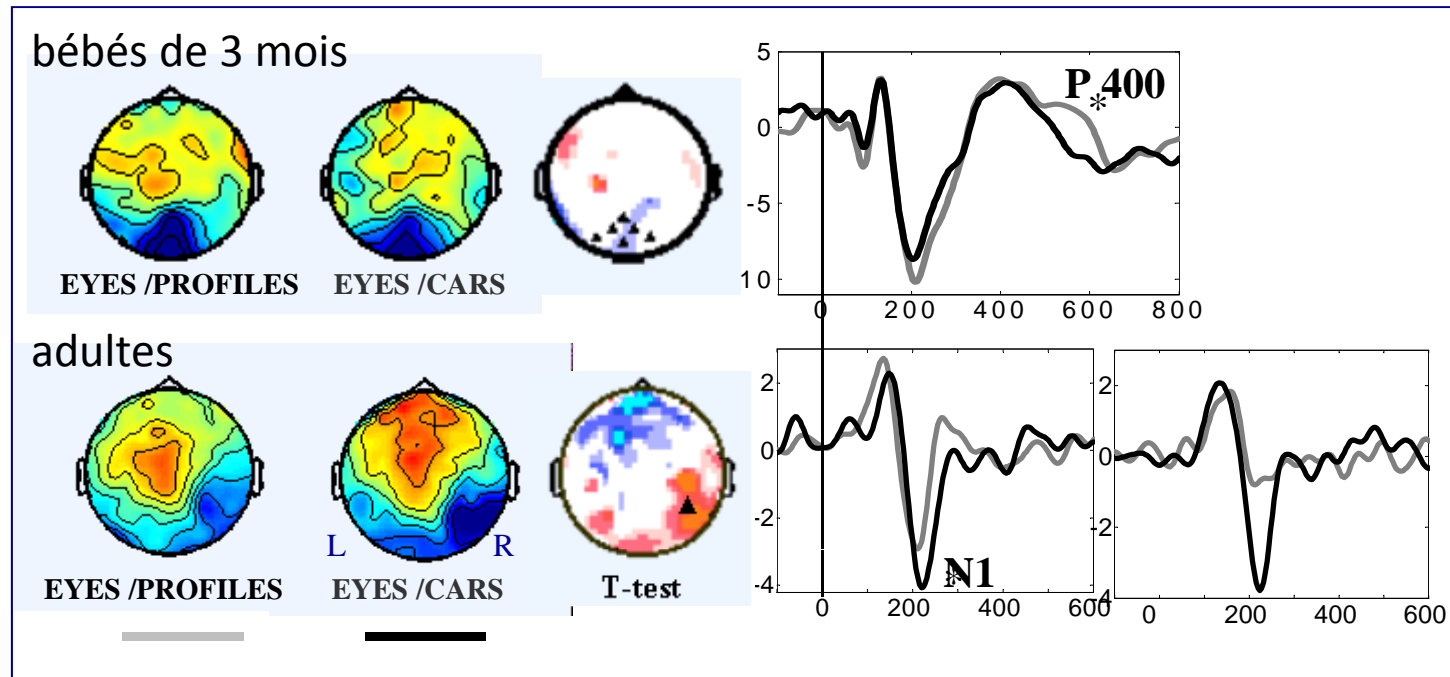
Gliga, T., & Dehaene-Lambertz, G. (2007). Development of a view-invariant representation of the human head. *Cognition*, 102(2), 261-288.



Expérience 2. Blocs de visages de profil, ou de voitures. Les adultes continuent de montrer une habituation très forte de la N170 (quoique moins prononcée et plus tardive que dans l'expérience 1).

Les bébés montrent un effet nettement plus tardif, et de forme différente: une augmentation de la P400.

Expérience 3. Pas d'effet significatif de contexte du corps humain.



# L'apprentissage d'une représentation invariante des visages

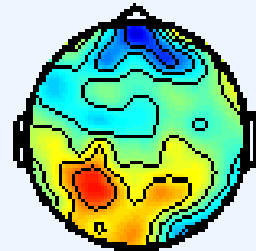
Gliga, T., & Dehaene-Lambertz, G. (2007). Development of a view-invariant representation of the human head. *Cognition*, 102(2), 261-288.



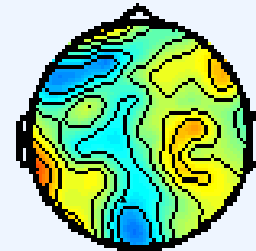
Les enfants apprennent-ils la corrélation entre face et profil?  
Trois minutes d'exposition à un film suffisent à faire avancer l'effet dans le temps (~60 ms).



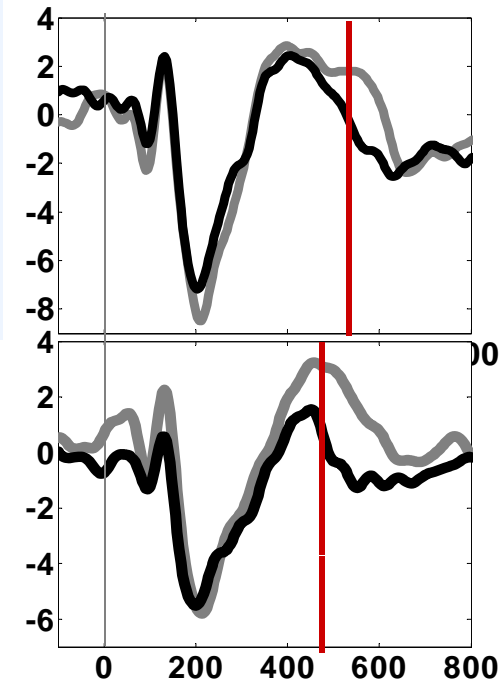
Sans Familiarisation



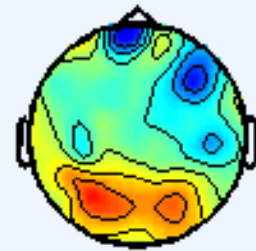
EYES / PROFILES



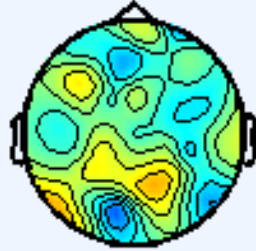
EYES / CARS



Après Familiarisation



EYES / PROFILES



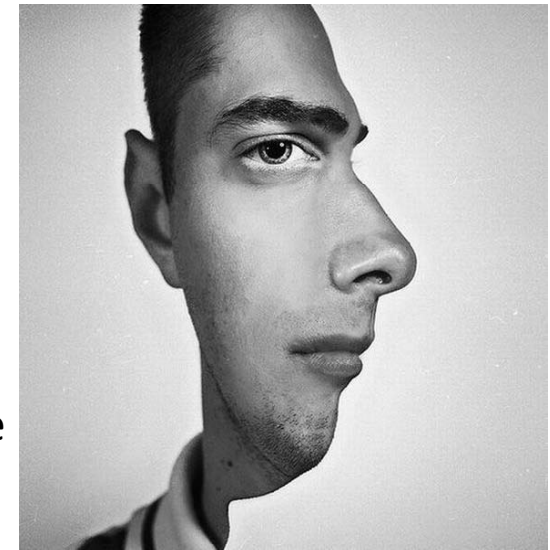
EYES / CARS



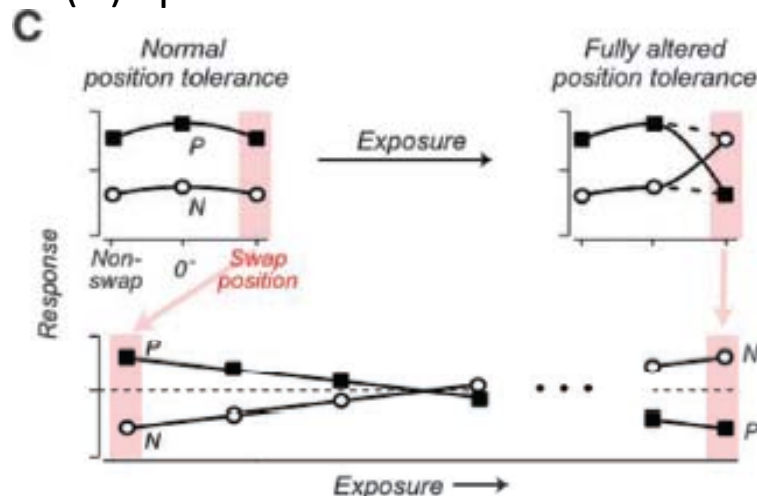
# L'apprentissage de la reconnaissance invariante des objets

Li, N., & DiCarlo, J. J. (2008). Unsupervised natural experience rapidly alters invariant object representation in visual cortex. *Science*, 321(5895), 1502-1507.

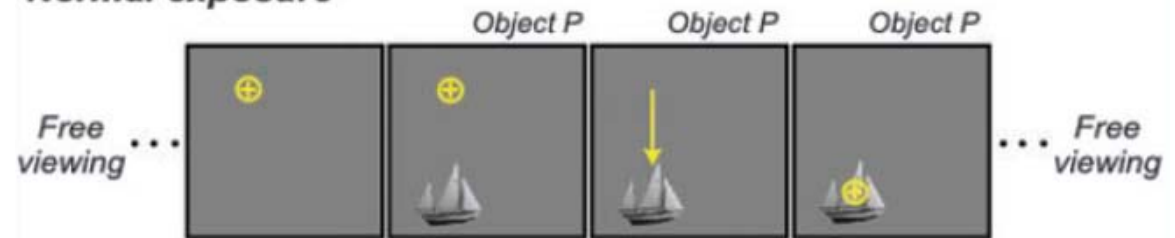
De nombreux neurones du cortex inféro-temporal du singe adulte présentent une invariance pour la taille et l'angle de vue d'un objet. Cette capacité résulterait d'un apprentissage statistique qui effectue la conjonction spatio-temporelle des différentes « vues » de l'objet.



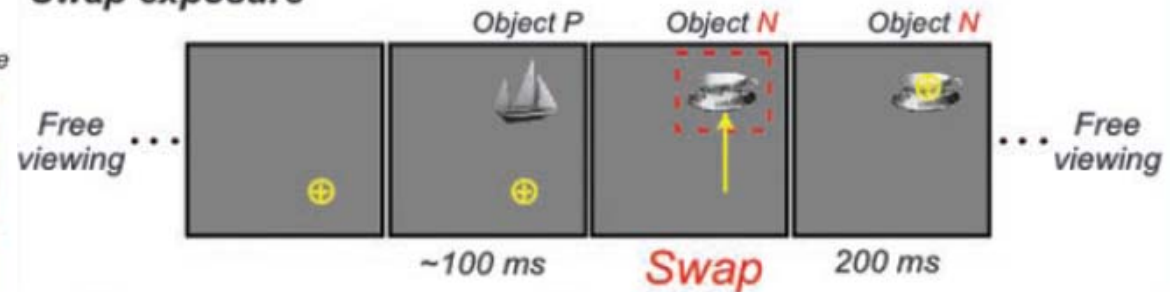
Pour tester cette hypothèse, Li et DiCarlo altèrent les statistiques: l'image d'un objet préféré (P), présenté à un certain point précis de la rétine, est remplacée par l'imagée d'un objet non-préféré (N) après la saccade.



## Normal exposure



## Swap exposure



Après quelques centaines d'essais, les neurones changent leur préférence.

« Apprentissage temporel lent et non-supervisé »

# Un exemple remarquable d'apprentissage non-supervisé: La détection automatique des mains, du regard et du mouvement

Ullman, S., Harari, D., & Dorfman, N. (2012). From simple innate biases to complex visual concepts. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 109(44), 18215-18220.

On montre au modèle de brèves vidéos . Le modèle apprend, sans aucune supervision, à y détecter des mains (sur la base de leur apparence et du contexte), et la direction du regard.

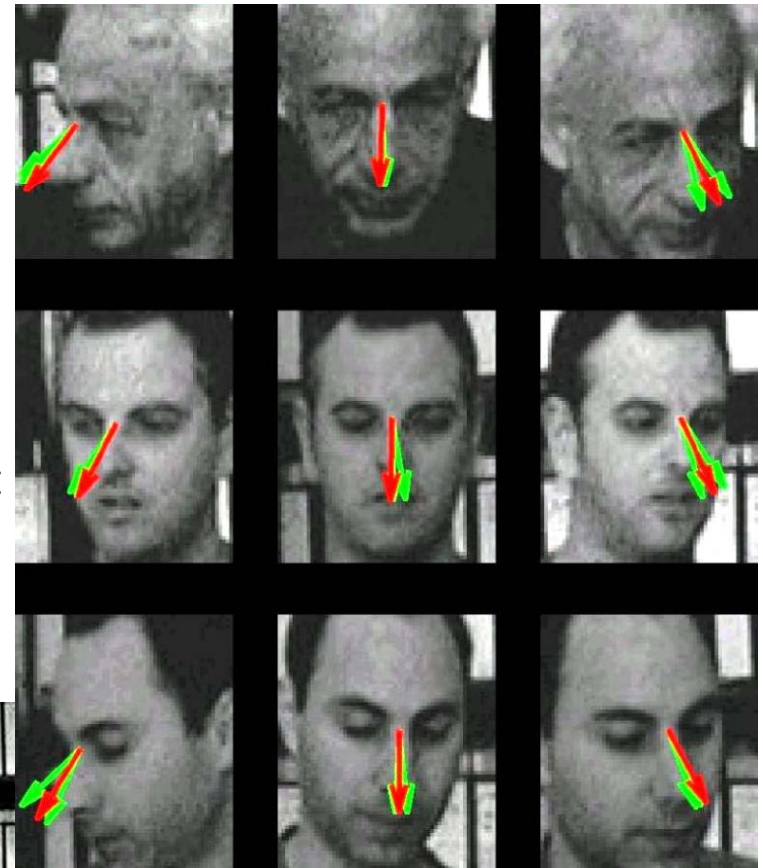
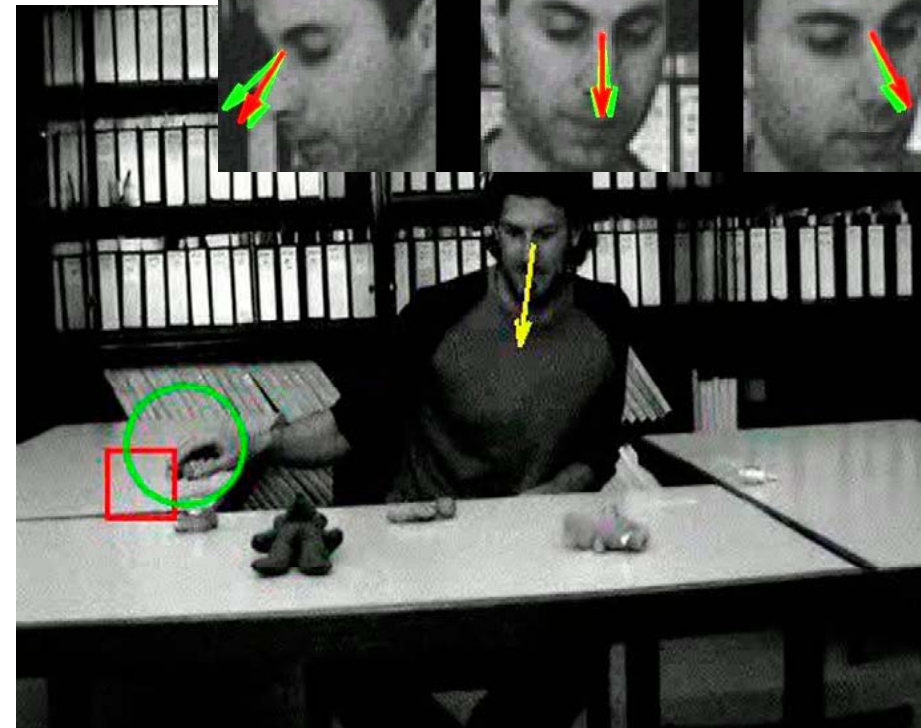
Face à un film complexe, l'apprentissage standard non-supervisé ne suffit pas. Les auteurs proposent de guider l'apprentissage par un mécanisme « inné »: la détection d'événements de mouvement (*movers*) dans lesquels une zone de l'image cause le déplacement d'une autre. Ce mécanisme fournit un signal interne qui guide les autres apprentissages. Un « proto-concept » oriente l'apprentissage vers des événements qui sont importants pour l'organisme, mais peu évidents dans l'image.



# Détection automatique des mains, du regard et du mouvement

Ullman, S., Harari, D., & Dorfman, N. (2012).  
*Proc Natl Acad Sci U S A*, 109(44), 18215-18220.

- 30 vidéos, d'une durée totale de 65 minutes, suffisent à apprendre la reconnaissance des mains et du regard.
- l'apprentissage se concentre sur les *movers*, et cela suffit à apprendre les mains (en utilisant le contexte du bras).
  - le modèle utilise également les *movers* comme un signal sur la direction probable du regard.



# Conclusions

En généralisant les résultats expérimentaux présentés aujourd'hui, il paraît vraisemblable que

1. Même les très jeunes enfants disposent déjà de **mécanismes prédictifs** qui
  - **internalisent les relations statistiques spatiales et temporelles** entre les entrées sensorielles qu'ils reçoivent
  - les utilisent pour **prédire les entrées futures**
  - et pour réagir avec **surprise** et **un signal interne d'erreur** lorsque ces prédictions sont violées
2. L'extraction de telles régularités statistiques, dans un système hiérarchique, permet d'apprendre, sans aucune supervision, à détecter des **catégories** comme les visages et les mains, et à les reconnaître de façon **invariante**.