

Cours 2013:

Le bébé statisticien

Stanislas Dehaene

Chaire de Psychologie Cognitive Expérimentale

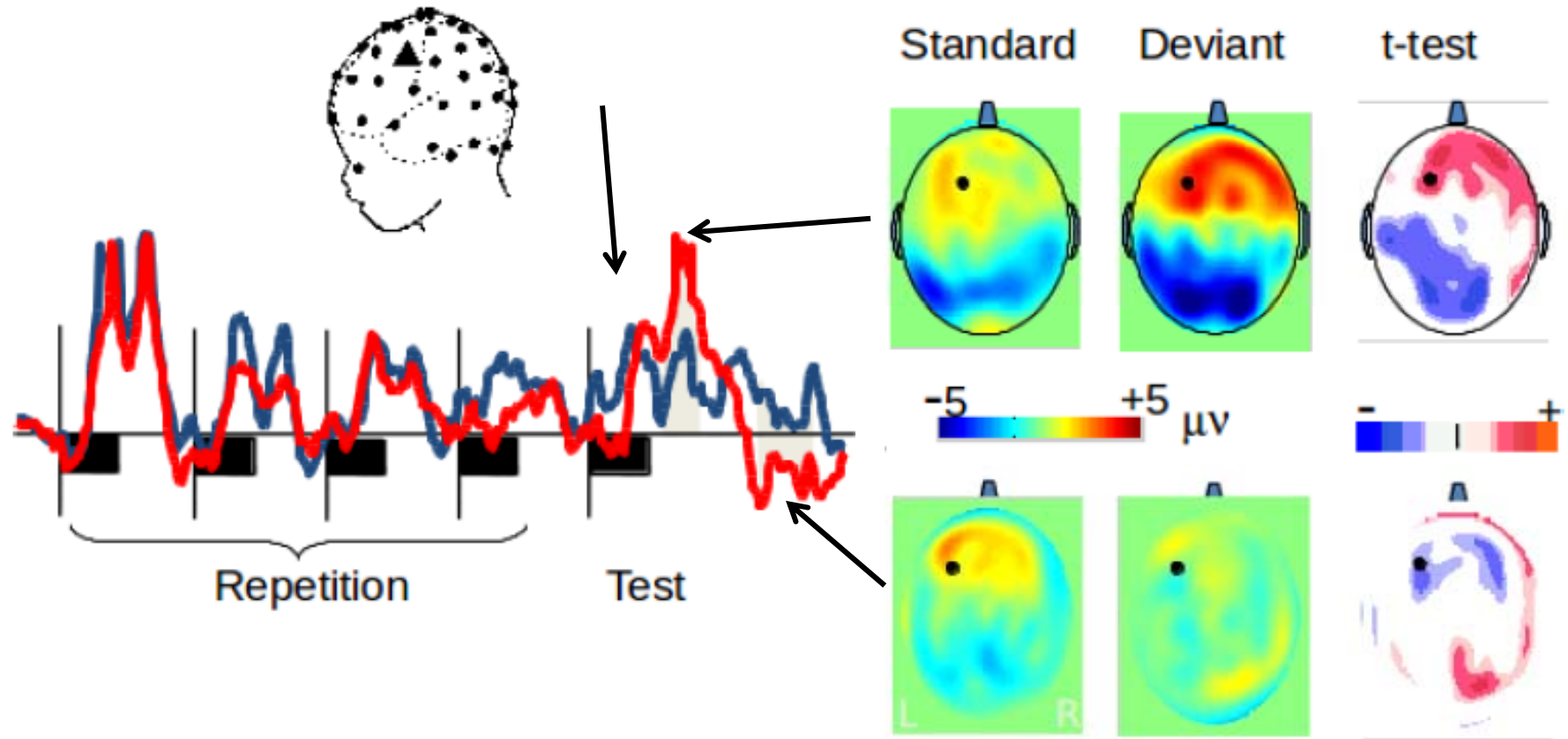
Cours n°4

La découverte et l'apprentissage des mots

Le cerveau de l'enfant est sensible à la nouveauté et génère des prédictions auditives

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

L'enfant est-il capable d'utiliser ces signaux d'erreur pour stabiliser des représentations internes de sa langue maternelle, à différents niveaux hiérarchiques?



Le vaste potentiel des modèles bayésiens dans le domaine du langage

- Pour l'acquisition du langage chez l'enfant
 - Apprentissage des sons du langage
 - Apprentissage de la forme des mots
 - Apprentissage de leur sens
 - Apprentissage des règles syntaxiques
- Pour le traitement du langage en temps réel chez l'adulte
 - Modèle de l'accès au lexique
 - Modèles statistiques de la grammaire
 - Inférences « gricéennes » sur les intentions des locuteurs

1. L'apprentissage des sons du langage: phonologie et prosodie



Des apprentissages extrêmement précoces

Les nouveau-nés préfèrent la voix de leur mère à celle d'une étrangère

DeCasper, A.J. and Fifer, W.P. (1980) Of human bonding: newborns prefer their mothers' voices. *Science* 208, 1174–1176

Les nouveau-nés de quelques jours préfèrent écouter des phrases dans leur langue maternelle

Mehler, J. et al. (1988) A precursor of language acquisition in young infants. *Cognition* 29, 144–178

L'apprentissage pourrait même survenir *in utero*:

Les nouveau-nés préfèrent écouter un passage que leur mère a lu à haute voix plusieurs fois durant les six dernières semaines de gestation.

DeCasper, A.J. and Spence, M.J. (1986) Prenatal maternal speech influences newborns' perception of speech sounds. *Infant Behav. Dev.* 9, 133–150

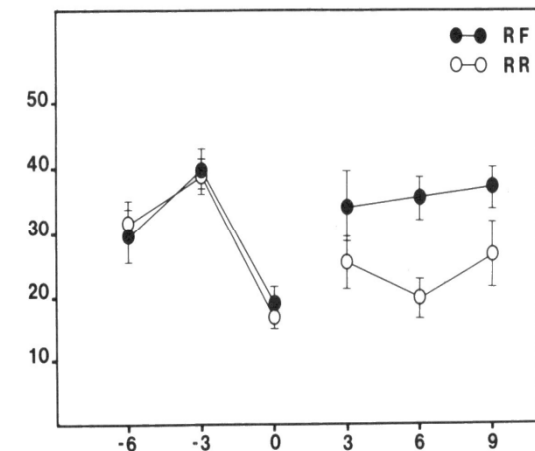
Le rythme cardiaque du fœtus de 37 semaines se ralentit lorsqu'il entend un passage que sa mère a lu pendant les 4 semaines précédentes

DeCasper, A.J. et al. (1994) Fetal reactions to recurrent maternal speech. *Infant Behav. Dev.* 17, 159–164

Les informations prosodiques lentes et de basse fréquence, qui passent le mieux *in utero*, semblent donc être apprises avant même la naissance.



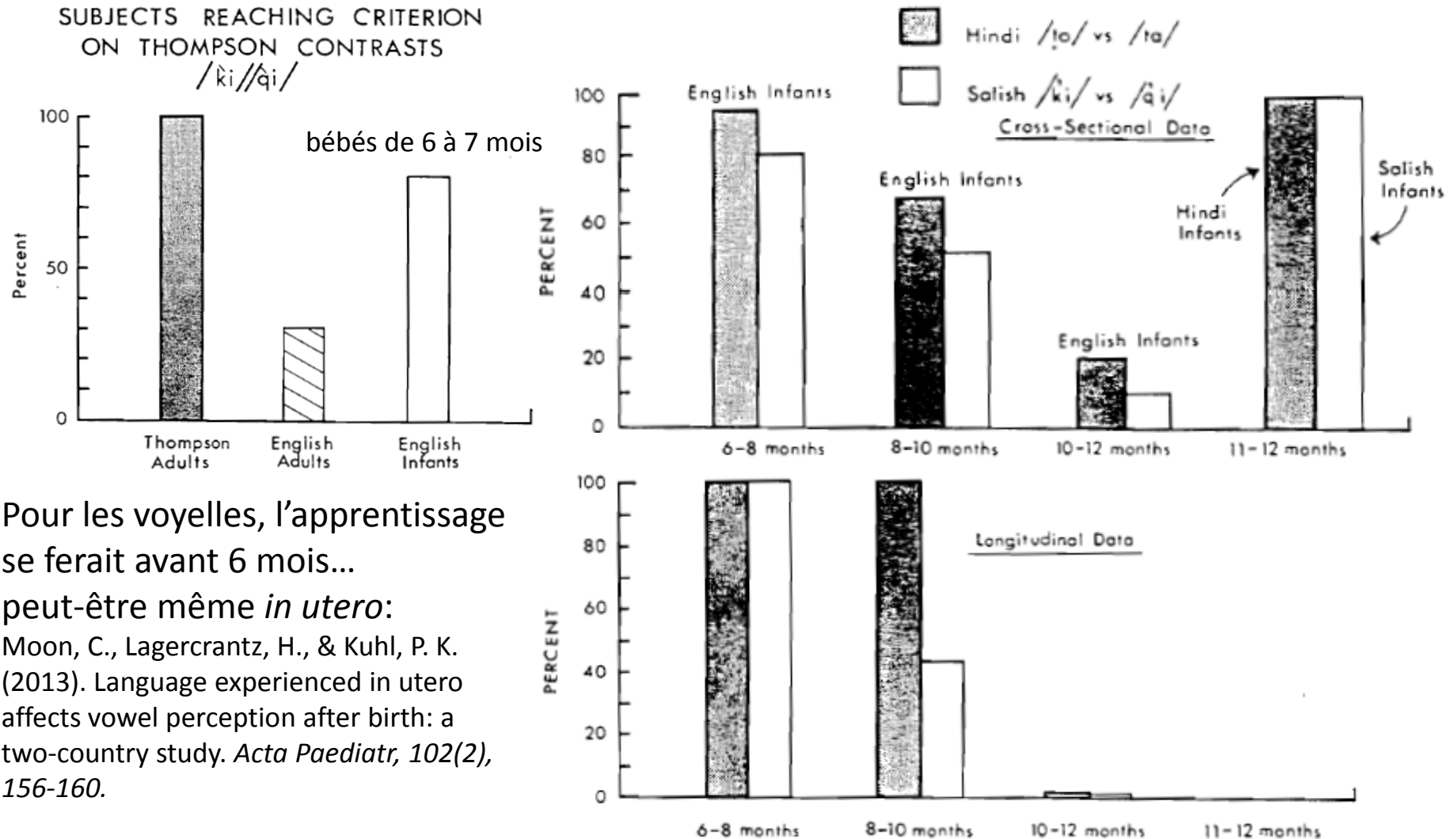
Succions/mn



Apprentissage de la phonologie dans la première année de vie

Les bébés convergent vers les catégories phonétiques de leur langue entre 6 et 12 mois.

Werker, J. F., & Tees, R. C. (1984). Cross-language speech perception: Evidence for perceptual reorganization during the first year of life. *Infant Behavior and Development*, 7, 49-63.



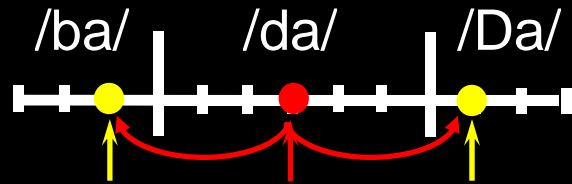
Pour les voyelles, l'apprentissage se ferait avant 6 mois...

peut-être même *in utero*:

Moon, C., Lagercrantz, H., & Kuhl, P. K. (2013). Language experienced in utero affects vowel perception after birth: a two-country study. *Acta Paediatr*, 102(2), 156-160.

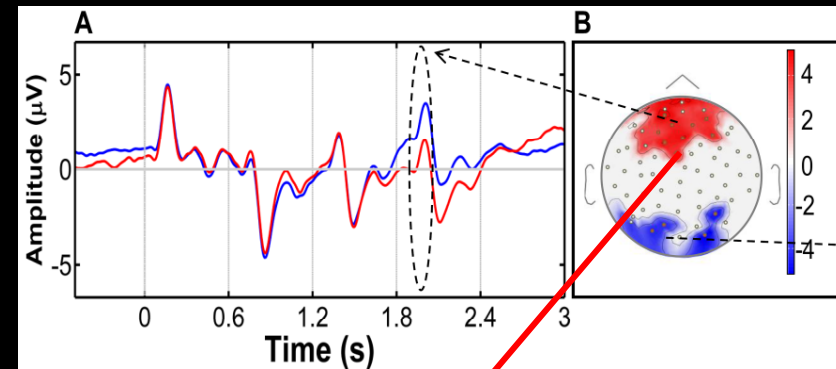
Les réponses cérébrales à la nouveauté phonétique changent entre 9 et 12 mois

Pena, M., Werker, J. F., & Dehaene-Lambertz, G. (2012). Earlier speech exposure does not accelerate speech acquisition. *J Neurosci*, 32(33), 11159-11163.

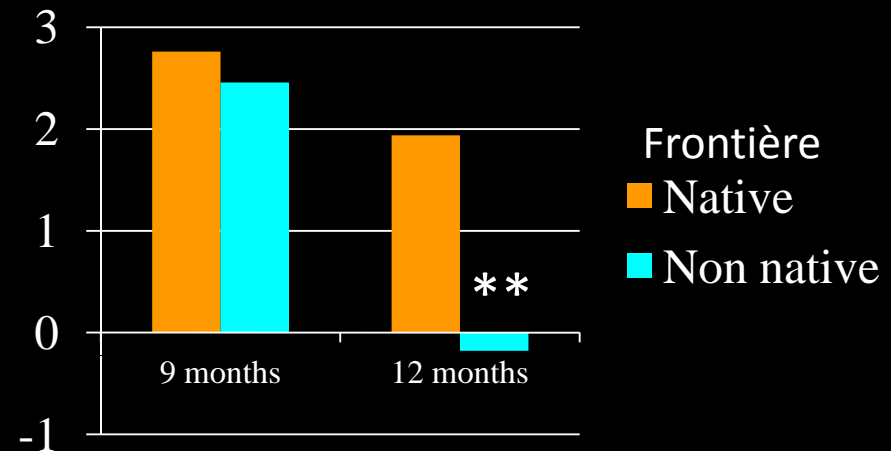


Les bébés de 9 mois devraient présenter deux frontières de catégories

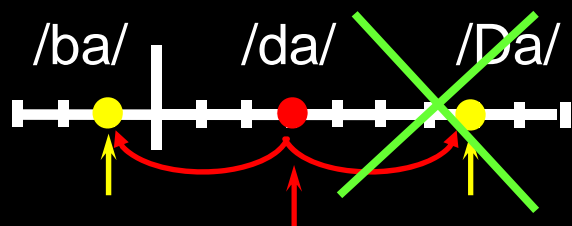
Réponse moyenne à la nouveauté



Amplitude de la réponse



Les bébés de 12 mois devraient ne présenter qu'une seule frontière catégorielle



L'apprentissage peut-il être accéléré chez les prématurés?

Pena, M., Werker, J. F., & Dehaene-Lambertz, G. (2012). Earlier speech exposure does not accelerate speech acquisition. *J Neurosci*, 32(33), 11159-11163.

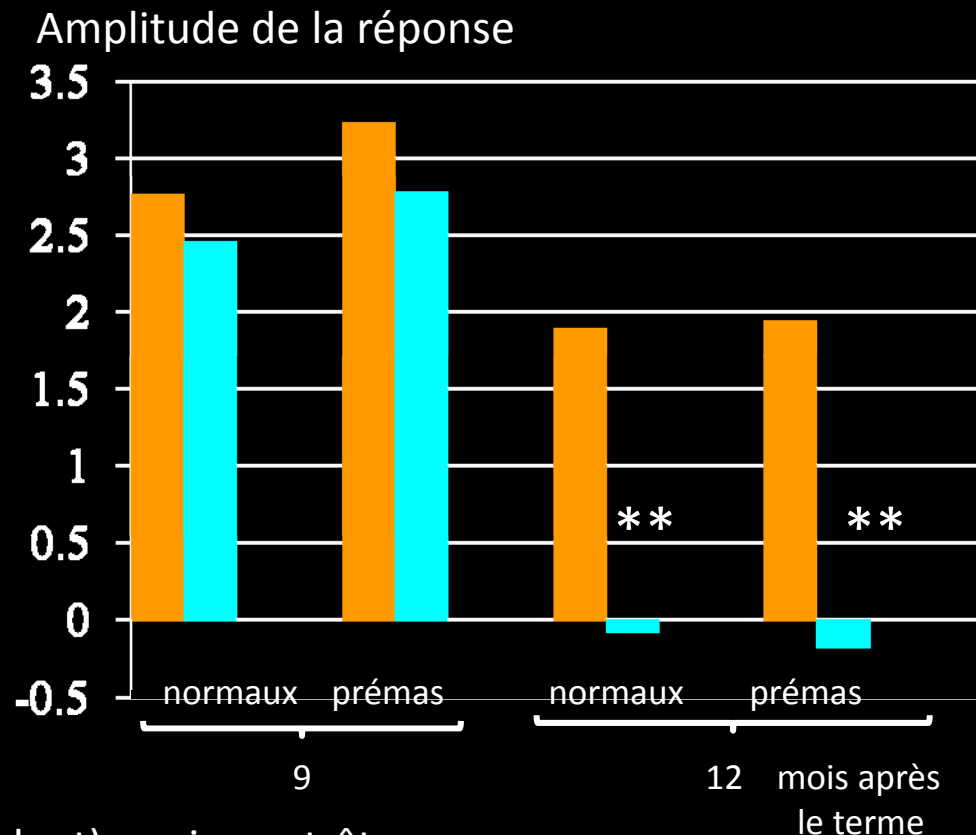
Deux groupes d'enfants sont testés à 9 et 12 mois après le terme normal de la grossesse:

- des enfants nés à terme (grossesse normale)
- des prématurés nés avant terme, et qui bénéficient donc de près de trois mois supplémentaires d'exposition au langage.

Ces groupes ne diffèrent pas.

La maturation cérébrale impose donc des limites à l'apprentissage des consonnes de la langue maternelle -ce qui n'est pas incompatible avec l'existence d'une discrimination à 6 mois et demi de grossesse (cours précédent), mais peut-être sans mémorisation à long-terme

- et n'exclut pas non plus un apprentissage dans les dernières semaines de gestation, particulièrement pour la prosodie et les voyelles.

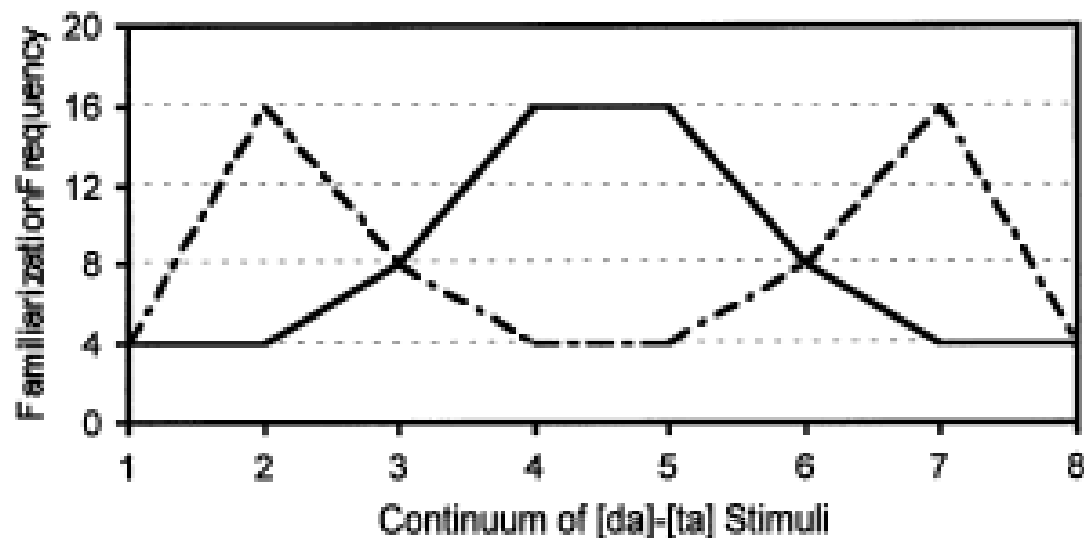


La preuve directe d'un apprentissage fondé sur les statistiques

Maye, J., Werker, J. F., & Gerken, L. (2002). Infant sensitivity to distributional information can affect phonetic discrimination. *Cognition*, 82(3), B101-111.

Quel est le mécanisme qui permet aux enfants de converger vers les catégories de leur langue maternelle? Serait-ce une sensibilité aux statistiques de la langue?

Des enfants de 6 et 8 mois, de familles anglophones, sont testés sur la discrimination du continuum da-ta. Ils sont exposés, pendant deux minutes, à 6 blocs de 16 syllabes du continuum da-ta (et 8 distracteurs). Puis on leur fait entendre, soit une alternance des syllabes 1 et 8, soit la répétition de 3 (ou de 8).



La discrimination *décroit* dans le groupe unimodal, alors qu'elle reste significative dans le groupe bimodal.

→ Preuve de principe (encore modeste) que la statistique contraint l'apprentissage.

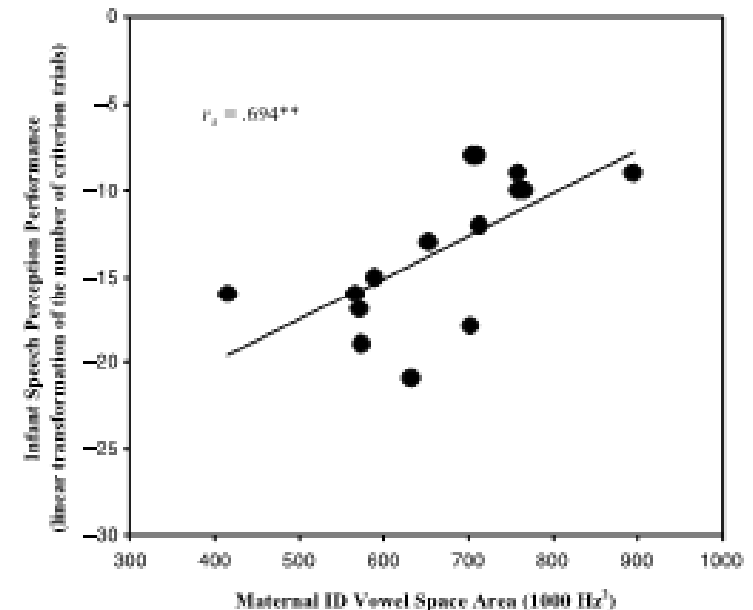
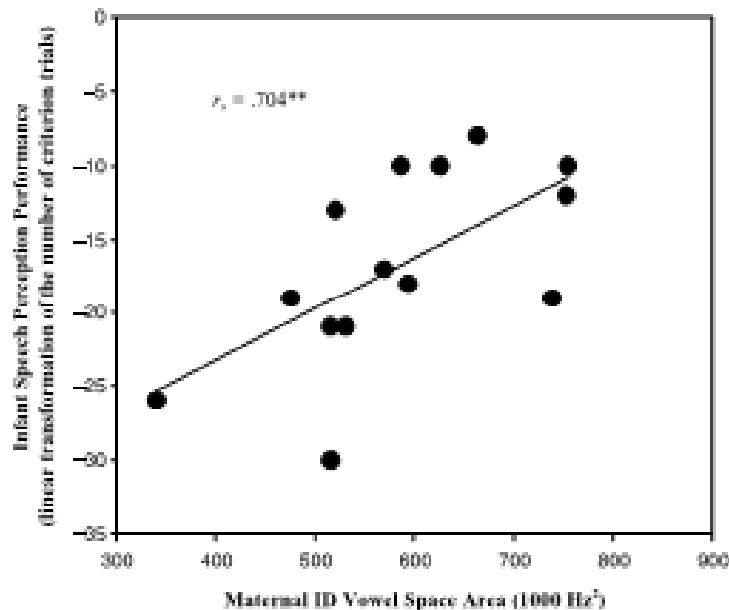
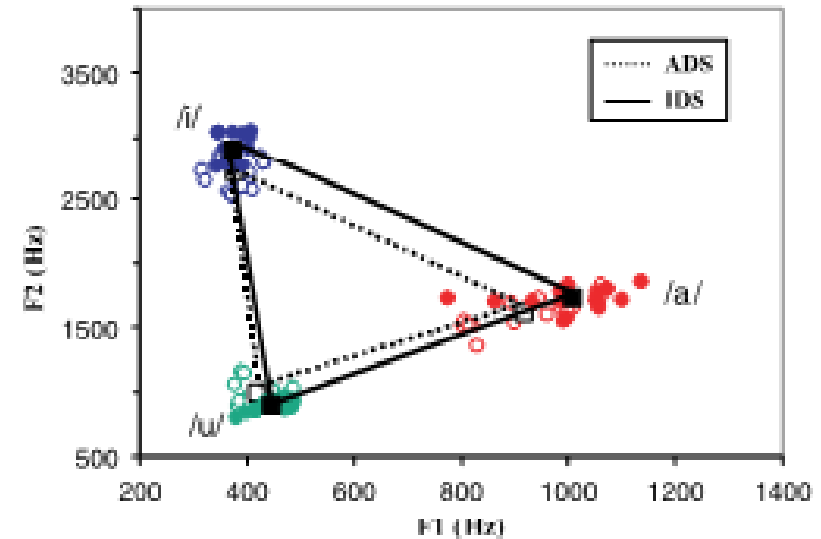
	Alternating trials (s)	Non-Alternating
6 months Unimodal	4.85 (0.47)	4.53 (0.51)
8 months Unimodal	4.98 (0.63)	5.20 (0.56)
6 months Bimodal	5.66 (0.44)	6.41 (0.32)
8 months Bimodal	5.45 (0.52)	6.15 (0.56)

L'importance de la clarté de l'élocution dans l'apprentissage

Liu, H.-M., Kuhl, P. K., & Tsao, F.-M. (2003). An association between mothers' speech clarity and infants' speech discrimination skills. *Developmental Science*, 6(3), F1-F10.

Les locuteurs augmentent typiquement la prosodie et les contrastes phonétiques lorsqu'ils s'adressent à un bébé (*motherese* ou « mamanais »)

La clarté de l'articulation maternelle influence les performances de discrimination phonétique (à 6-8 mois et à 10-12 mois).



L'importance des interactions linguistiques dans la première année de vie

Kuhl, P. K., Tsao, F. M., & Liu, H. M. (2003). Foreign-language experience in infancy: effects of short-term exposure and social interaction on phonetic learning. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 100(15), 9096-9101.

L'exposition des enfants à 12 sessions de 25 minutes d'interaction avec une locutrice du chinois permet aux enfants américains de conserver, à 10-12 mois, la discrimination d'un contraste consonantique propre au chinois.

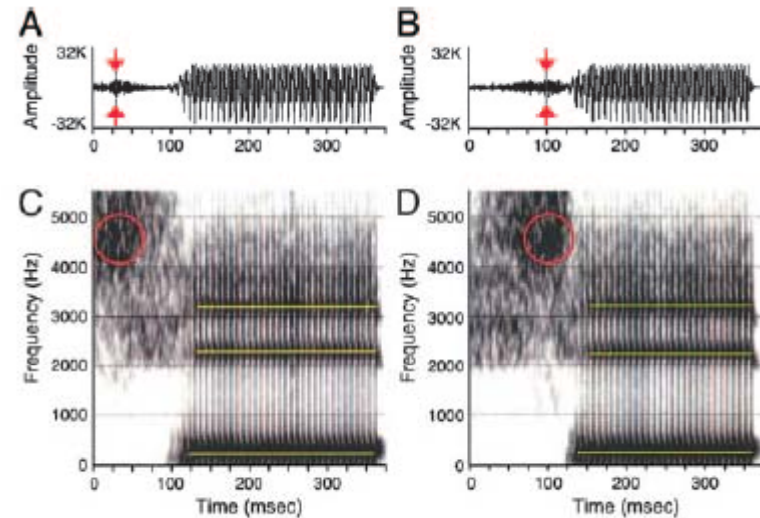
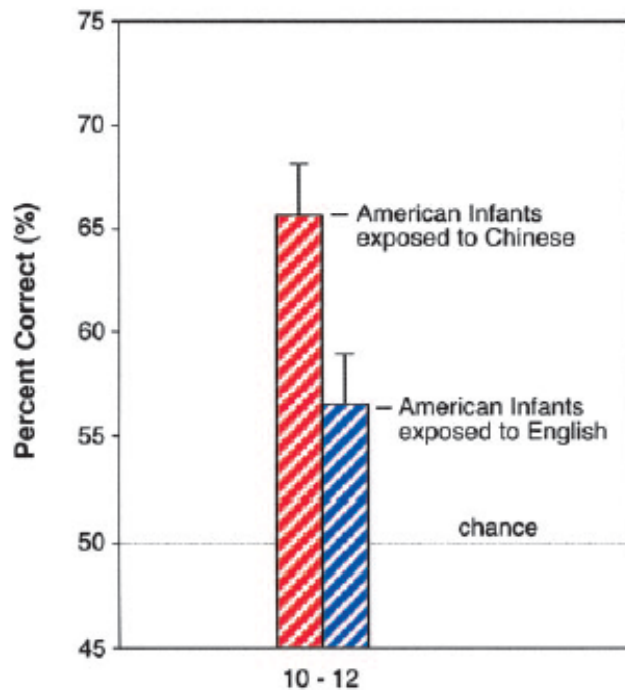
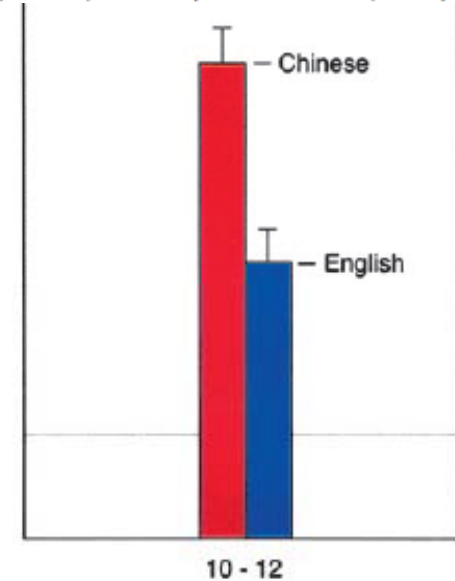
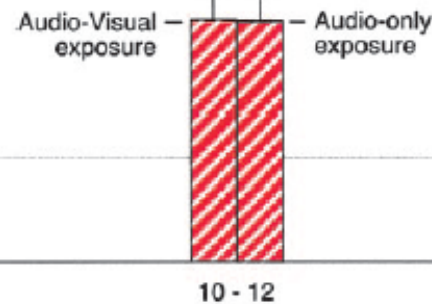


Fig. 1. Two Mandarin Chinese consonant-vowel syllables used to test infant learning in Experiments 1 and 2, an affricate (A and C) and a fricative (B and D) syllable. Waveforms (A and B) show amplitude over time, and spectro-



L'apprentissage se produit-il par une exposition passive?



Age in Months

2. L'apprentissage de la forme des mots



Les bébés apprennent à reconnaître certains mots dès la première année de vie

Jusczyk, P. W., & Hohne, E. A. (1997). Infants' memory for spoken words. *Science*, 277(5334), 1984-1986.

Des bébés de 8 mois sont exposés, pendant 10 jours, à 30 minutes d'histoires pour enfants.

On extrait de ces histoires 36 mots fréquents, et on choisit 36 mots de contrôle.

Seuls les enfants exposés aux histoires préfèrent écouter la liste de mots déjà entendus.

La nature des indices utilisés par les enfants reste débattue.

La parole continue contient des indices de segmentation que les bébés de 3 jours discriminent (Christophe, Dupoux et al., 1994). Mais les bébés pourraient aussi utiliser des indices statistiques.

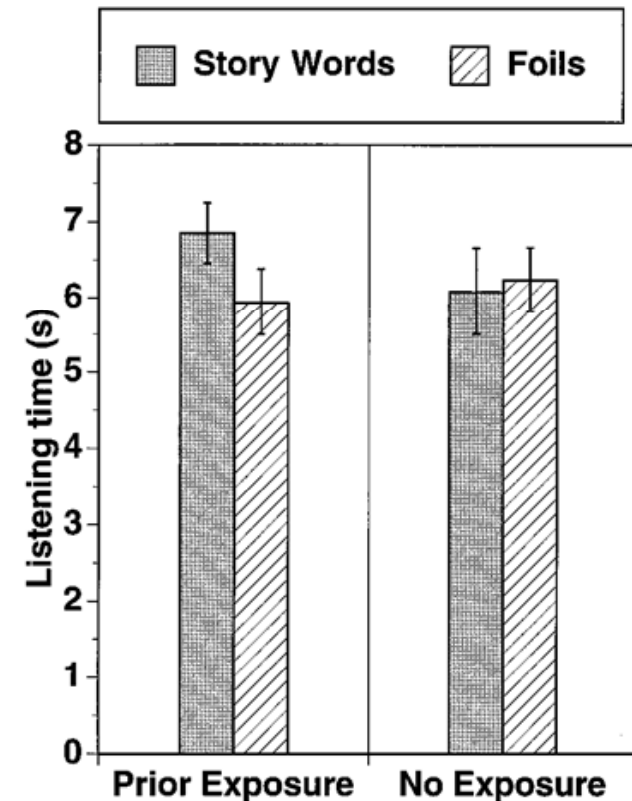
Examples of Test Materials

Story-Word List

sneeze
elephant
ants
gray
vine
python
peccaries
back
laugh
out
best
jungle

Foil Word List

aches
apricot
sloth
jaunt
ox
lanterns
caribous
front
burp
change
beach
camel



L'apprentissage statistique de la forme des mots

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)	$t(23) = 2.4, P < 0.03$

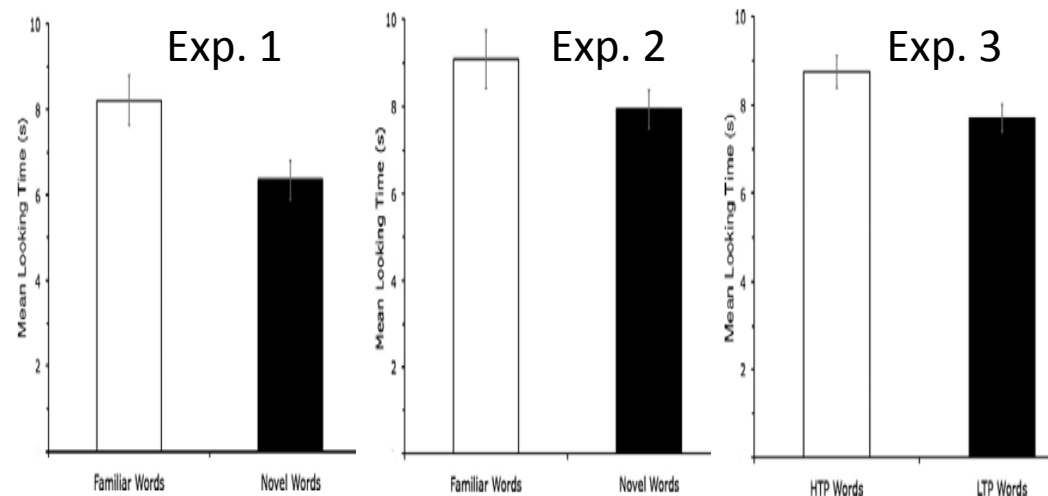
L'utilisation de l'apprentissage statistique dans la parole continue

Pelucchi, B., Hay, J. F., & Saffran, J. R. (2009). Statistical learning in a natural language by 8-month-old infants. *Child Dev*, 80(3), 674-685.

Des enfants de 8 mois, de familles anglophones, sont exposés à 2 minutes de stimuli italiens bien contrôlés (6 syllabes/seconde).
 - dans l'expérience 1, certains mots sont présents, d'autres non (expérience comparable à Jusczyk et al.)
 → les enfants préfèrent écouter les mots *anciens* – ce qui semble être le cas dans la plupart des expériences avec la parole continue.
 - dans l'expérience 2, toutes les syllabes des mots tests sont présentes, mais isolées.
 - dans l'expérience 3, tous les mots sont entendus, mais certains plus fréquemment que d'autres.

Familiar Words, Novel Words, HTP-Words, and LTP-Words Used in the Testing Phase of Experiments 1, 2, and 3

Exp.	Language	Familiar words	Novel words	HTP-words	LTP-words
1	Language 1A	<i>fuga, melo</i>	<i>pane, tema</i>	—	—
	Language 1B	<i>pane, tema</i>	<i>fuga, melo</i>	—	—
2	Language 2A	<i>fuga, melo</i>	<i>pane, tema</i>	—	—
	Language 2B	<i>pane, tema</i>	<i>fuga, melo</i>	—	—
3	Language 3A	—	—	<i>fuga, melo</i>	<i>bici, casa</i>
	Language 3B	—	—	<i>bici, casa</i>	<i>fuga, melo</i>



L'apprentissage statistique crée des entrées lexicales que l'enfant peut attacher à des sens

Graf Estes, K., Evans, J. L., Alibali, M. W., & Saffran, J. R. (2007). Can infants map meaning to newly segmented words? Statistical segmentation and word learning. *Psychol Sci*, 18(3), 254-260.

Hay, J. F., Pelucchi, B., Graf Estes, K., & Saffran, J. R. (2011). Linking sounds to meanings: infant statistical learning in a natural language. *Cognitive Psychology*, 63(2), 93-106.

Des enfants de 17 mois sont exposés à des séquences dans lesquelles certaines transitions reviennent fréquemment, formant deux « mots » bisyllabiques.

manopigatimaymanodobumanotimaypigadobupigadob
utimaydobutimaymanotimaypigadobupigatimayman...

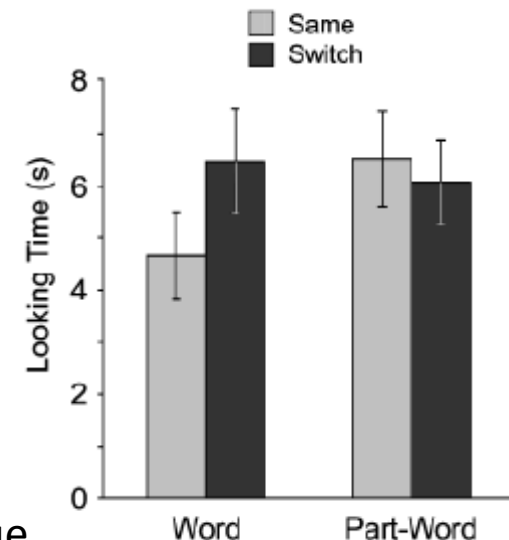
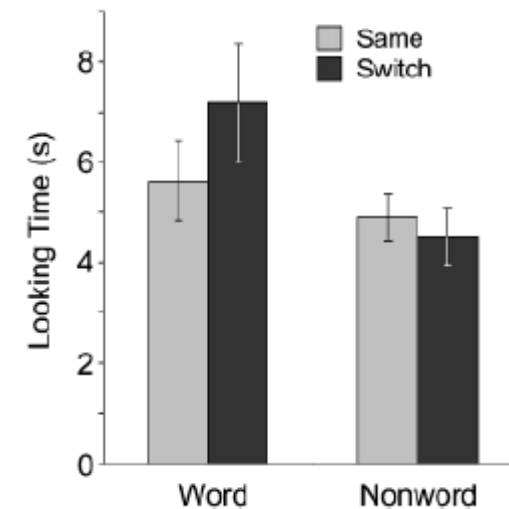
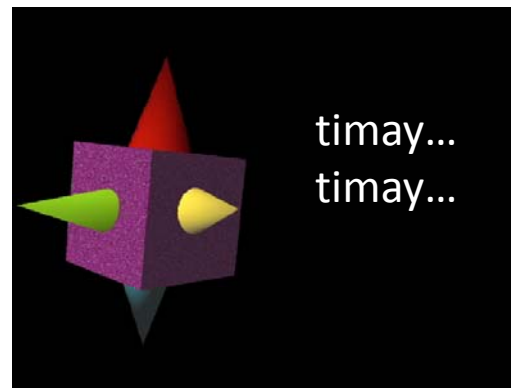
Par la suite, on associe ces deux mots à des objets.

D'autres mots bisyllabiques nouveaux (*part-words*) sont également associés à des objets.

Enfin on présente des essais de test où ces associations sont respectées ou violées.

Les enfants regardent plus longtemps lorsque les associations sont violées – mais uniquement pour les mots qui pouvaient être extraits de la séquence précédente.

Ces résultats sont partiellement répliqués avec la parole continue.



A quel âge débutent les premiers apprentissages lexicaux?

L'apprentissage du prénom dès cinq mois

Mandel, D. R., Jusczyk, P. W., & Pisoni, D. B. (1995). Infants' recognition of the sound patterns of their own names. *Psychological Science*, 6(5), 314-317.

Dès 5 mois, les enfants préfèrent écouter leur prénom plutôt que celui d'un autre enfant – même si celui-ci partagent la même accentuation.

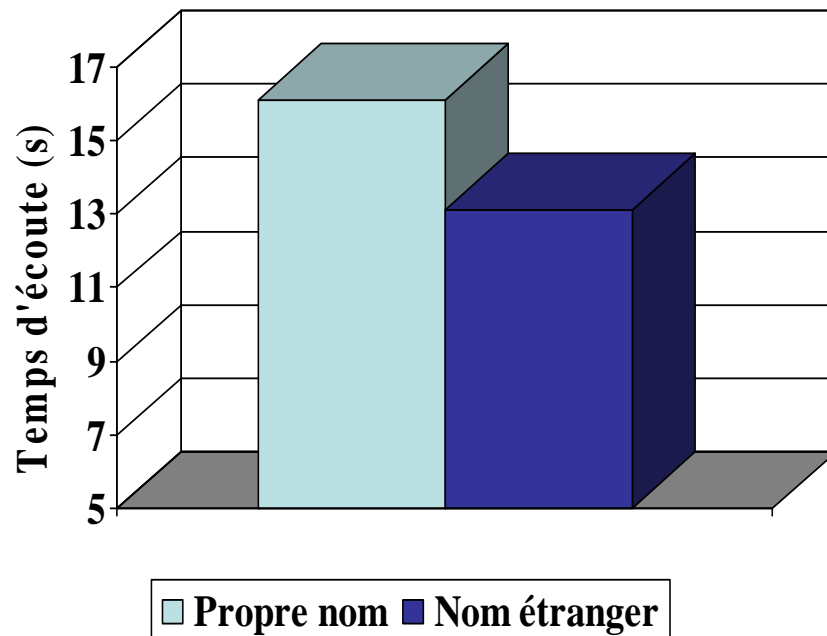


Table 1 List of children's names and corresponding foil sets

Child's name	Same-stress foil	Different-stress foils	
		Group 1	Group 2
Joshua	Agatha	Mana	Eliza
Johnny	Abby	Elaine	Lamont
Sarah	Michael	Kathleen	Nicole
Becca	Aaron	Rumiz	Michele
Abby	Carol	Michele	Rumiz
Emmie	Connor	Denise	Marie
Christopher	Jessica	Eliza	Marissa
Henry	Corey	Rumiz	Christine
Katie	Kevin	Denise	Lavern
Cameron	Jenna	Elaine	Nicole
Brandon	Kevin	Lorraine	Nicole
Emily	Christopher	Marissa	Samantha
Rachel	Meghan	Darlene	Justine
Dana	Brandon	Elaine	Justine
Nick	Ben	Lucy	Travis
Erin	Connor	Rumiz	Christine
Corey	Lucy	Christine	Nicole
Ky	Meg	Audrey	Connor
Sam	Bob	Carol	Henry
Jojo	Mimi	Denise	Lavern
Philip	Kathy	Michele	Rumiz
Steven	Kyle	Rumiz	Michele
Emily	Joshua	Marissa	Mana
Travis	Lucy	Darlene	Michele

Un apprentissage lexical de proche en proche

Bortfeld, H., Morgan, J. L., Golinkoff, R. M., & Rathbun, K. (2005). Mommy and me: familiar names help launch babies into speech-stream segmentation. *Psychol Sci*, 16(4), 29

Des enfants de 6 mois écoutent une histoire dans laquelle des mots sont systématiquement associés à leur propre prénom et à un prénom inconnu (exp. 1).

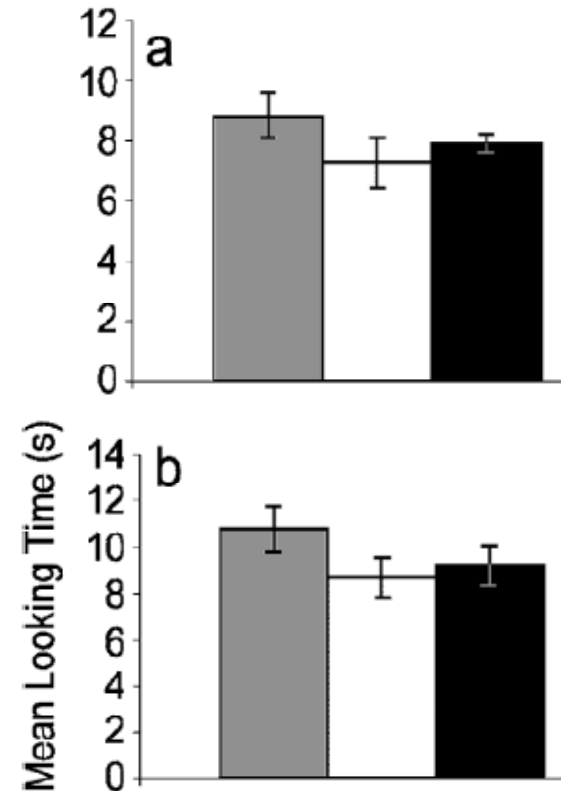
Par la suite, ils préfèrent écouter le mot associé à leur prénom.

Dans l'expérience 2, ces résultats sont répliqués avec le mot *Mommy* (vs *Lola*) ou *Mama* (vs *Lolly*).

Maggie's bike had big, black wheels. The girl rode *Maggie's* bike. The bell on *Maggie's* bike was really loud. She knew *Maggie's* bike could go very fast. The boy played with *Maggie's* bike. *Maggie's* bike always stays in the garage.

Hannah's cup was bright and shiny. A clown drank from *Hannah's* cup. The other one picked up *Hannah's* cup. *Hannah's* cup was filled with milk. She put *Hannah's* cup back on the table. Some milk from *Hannah's* cup spilled on the rug.

■ Familiar-Name Target
 □ Alternate-Name Target
 ■ Control Words



Maggie: bike cup loud
 Hannah: cup bike loud

L'apprentissage de l'ordre des mots à 12 mois

Saffran, J., & Wilson, D. P. (2003). From Syllables to Syntax: Multilevel Statistical Learning by 12-Month-Old Infants. *Infancy*, 4, 273-284.

Finite State Grammars and Vocabularies for Languages A and B

Language A grammar: A → B → C → D → E

Language B grammar: A → D → C → B → E

Vocabulary:

A: *dato, kuga*

B: *pidu, gobi*

C: *buto, tiga*

D: *badu, tubi*

E: *dipa, tako*

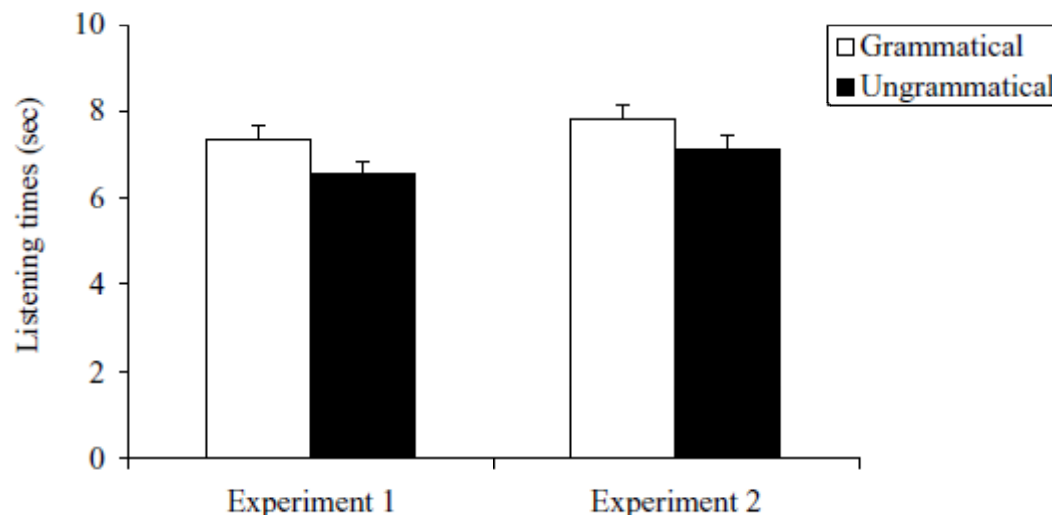
⟩ dernière syllabe
identique

40 enfants de 11 à 12 mois sont exposés à 16 phrases, chacune répétée une fois, issues d'une grammaire simple (à états finis).

Par la suite on les teste avec des phrases nouvelles, issues de la même grammaire ou d'une autre grammaire de même complexité.

Les enfants écoutent plus longtemps les phrases grammaticales.

Les résultats sont répliqués avec une grammaire plus simple (on ôte le cinquième mot).



Les auteurs suggèrent que les enfants apprennent simultanément les mots et les transitions entre mots.

Le résultat ne peut pas s'expliquer par les probabilités de transition entre syllabes – mais peut-être les triplets, ou la « mélodie » complète?

Quelles aires cérébrales sont sensibles à l'apprentissage statistique?

Overath, T., Cusack, R., Kumar, S., von Kriegstein, K., Warren, J. D., Grube, M., et al. (2007). An information theoretic characterisation of auditory encoding. *PLoS Biol*, 5(11), e288.

IRM fonctionnelle chez l'adulte.

Présentation de séquences de tons purs.

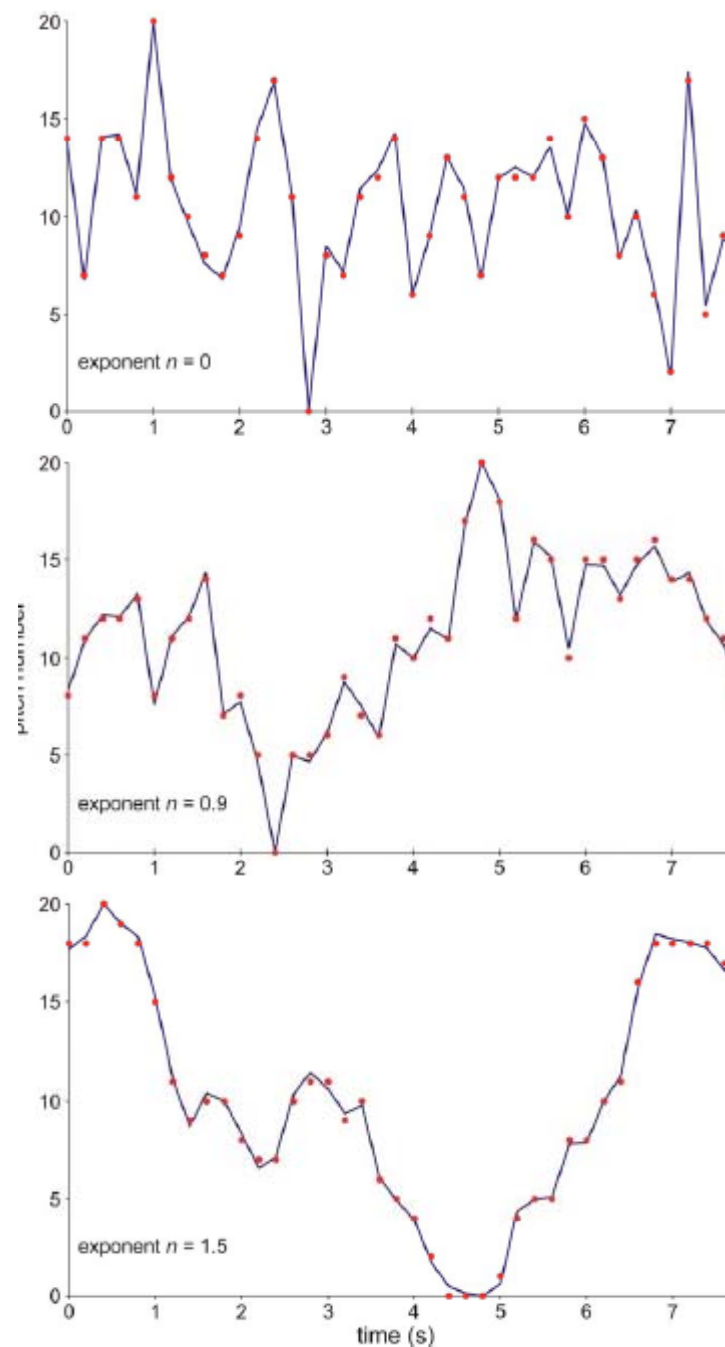
Selon les blocs, l'entropie de la séquence varie.

De brèves séquences fractales (durée = 7.6 secondes)

sont générées selon un spectre de puissance en f^{-n} , en faisant varier l'exposant n .

Quand n est petit, la séquence est dominée par les hautes fréquences, donc très changeante d'un instant à l'autre.

Quand n est plus grande, la séquence est dominée par les basses fréquences, donc sa hauteur tonale change lentement.



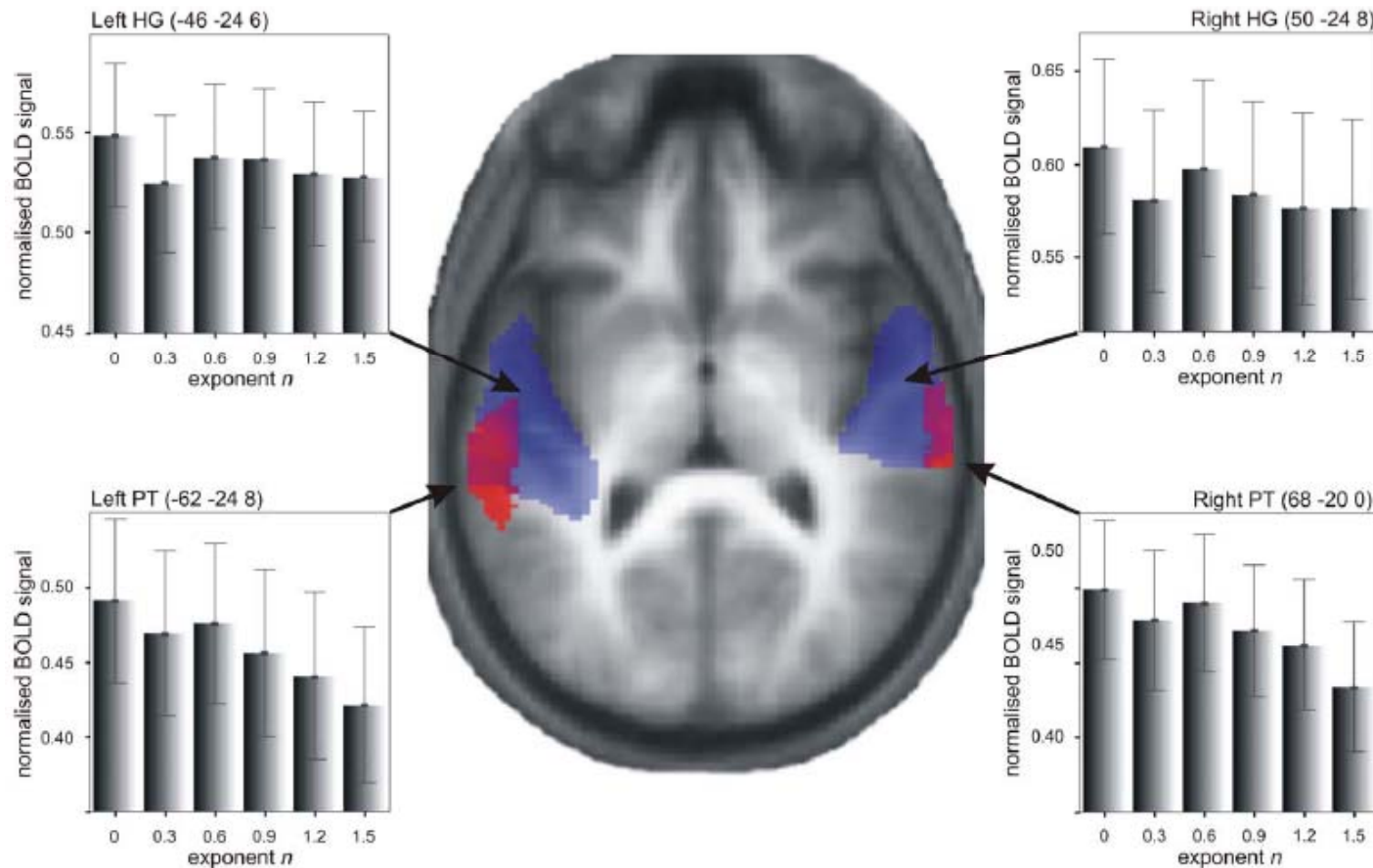
Quelles aires cérébrales sont sensibles à l'apprentissage statistique?

Overath, T., Cusack, R., Kumar, S., von Kriegstein, K., Warren, J. D., Grube, M., et al. (2007). An information theoretic characterisation of auditory encoding. *PLoS Biol*, 5(11), e288.

Dissociation entre les aires auditives primaires et leur « ceinture », insensibles à l'entropie, et le planum temporale, dont l'activité décroît avec l'entropie.

Pas de variation dans le sens opposé.

“We suggest that at least part of the function of PT is to compress the neural code corresponding to the initial acoustic signal (e.g., via sparse or predictive coding)”



Quelles aires cérébrales sont sensibles à l'apprentissage statistique?

Tremblay, P., Baroni, M., & Hasson, U. (2012). Processing of speech and non-speech sounds in the supratemporal plane: Auditory input preference does not predict sensitivity to statistical structure. *Neuroimage*, 66C, 318-332.

70 syllabes humaines et 70 syllabes issues de chants d'oiseaux sont présentées en brèves séquences de 32 syllabes.

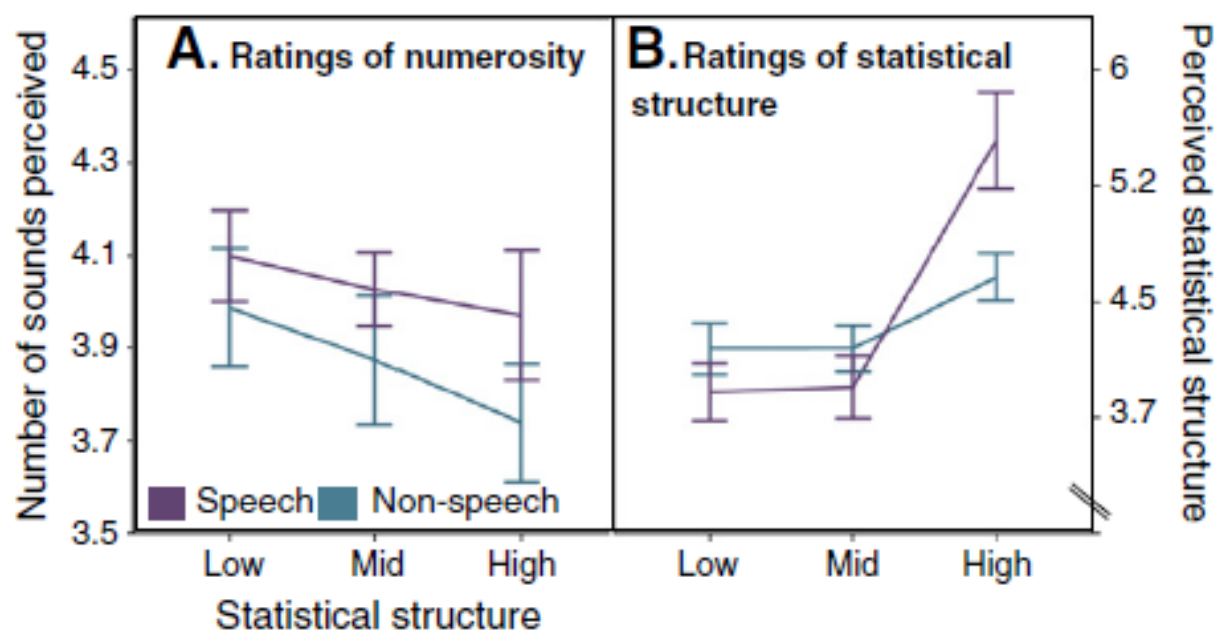
Celles-ci sont assemblées en périodes de **10 minutes**, chacune avec une structure statistique différente: depuis une matrice de transition aléatoire jusqu'à une matrice beaucoup plus contrainte. Présentation passive, accompagnée d'une tâche visuelle peu exigeante.

Dans un bloc distinct, les participants montrent une bonne perception de la structure des stimuli, meilleure pour la parole que pour les chants d'oiseaux.

Sur le plan théorique, sur une durée aussi longue, les effets d'apprentissage devraient dominer:

-l'activation devrait diminuer dans les régions dont le signal est prédit

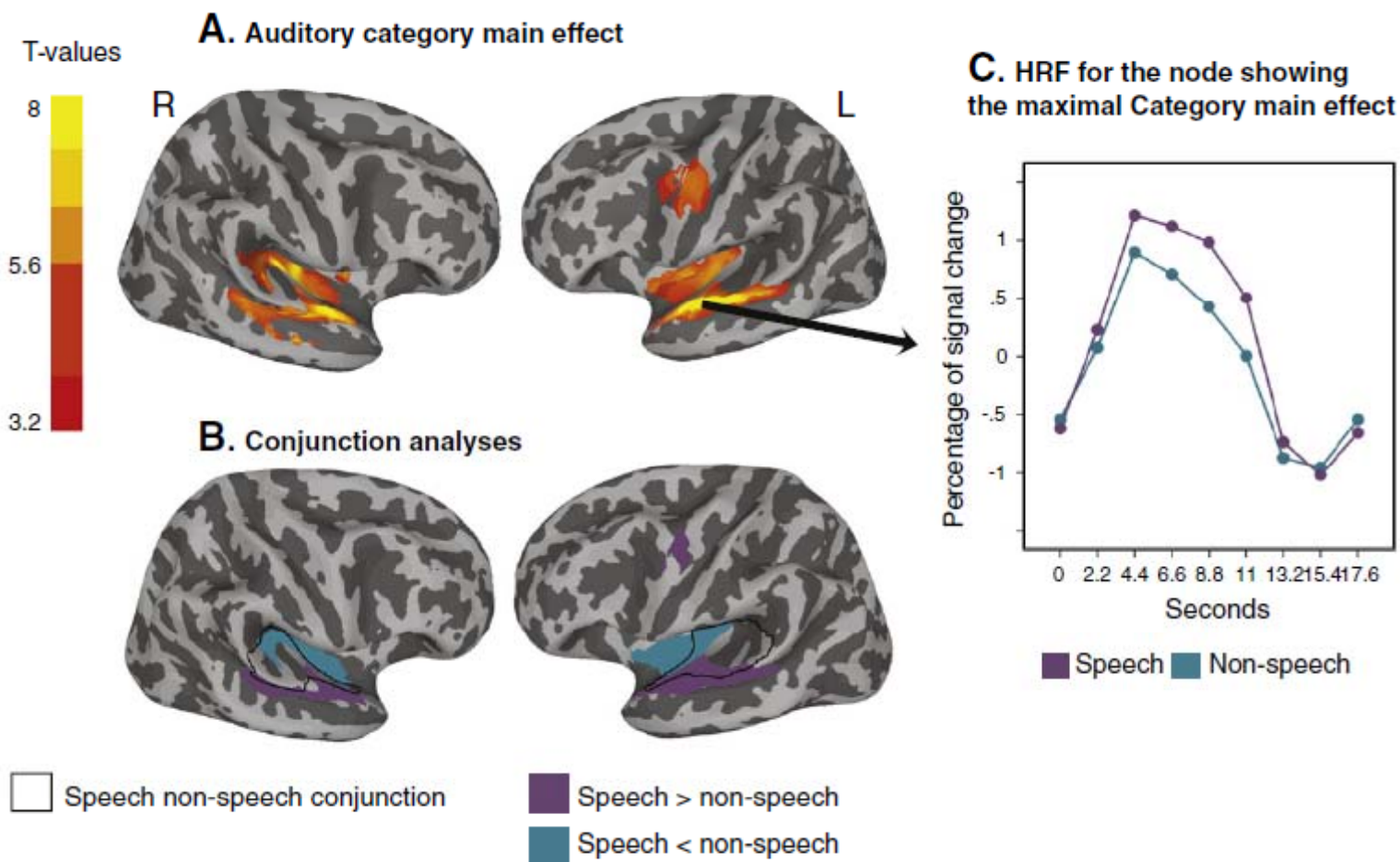
- mais augmenter dans les régions qui apprennent à représenter le signal, d'autant plus que ce qui est appris est complexe.



Quelles aires cérébrales sont sensibles à l'apprentissage statistique?

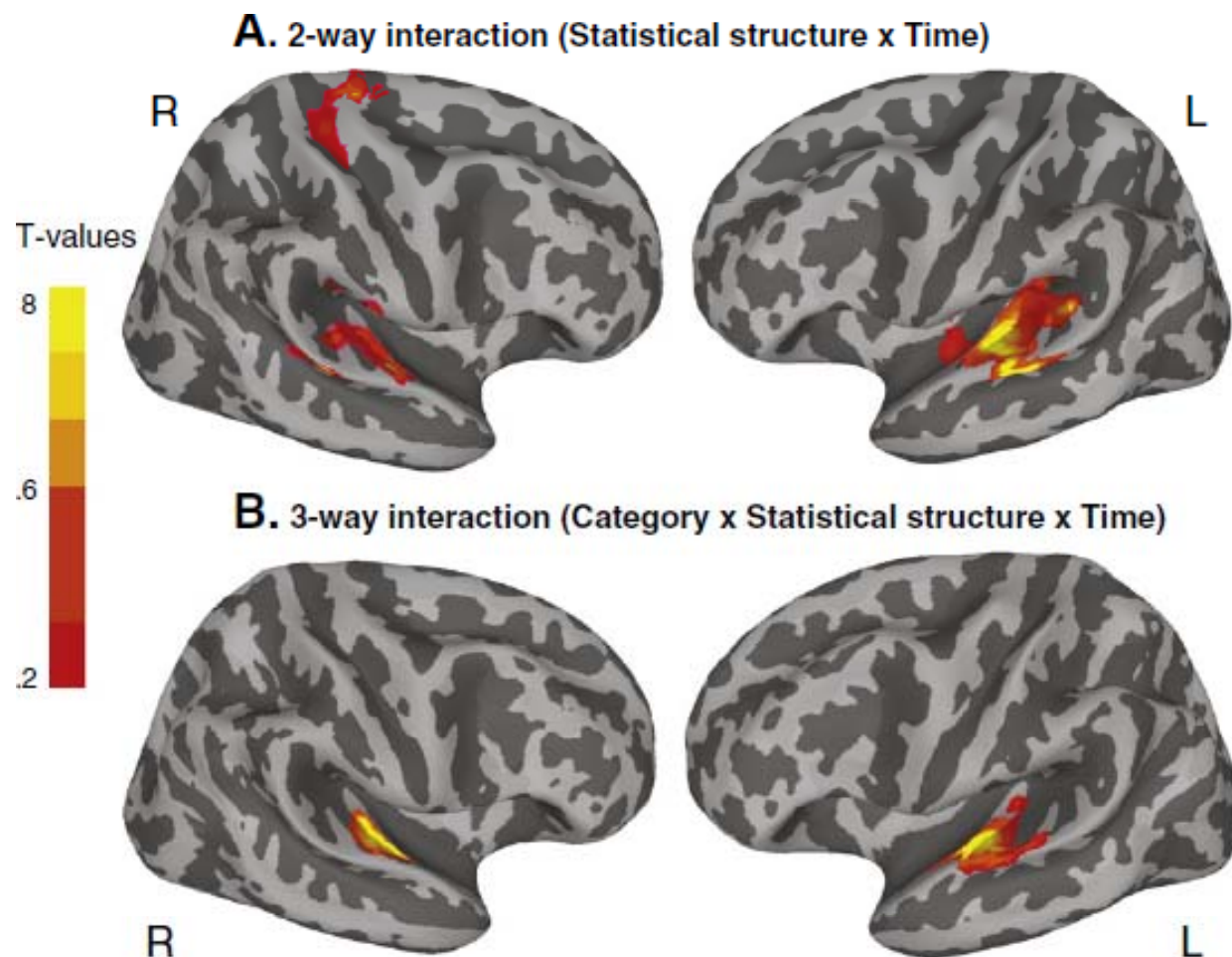
Tremblay, P., Baroni, M., & Hasson, U. (2012). Processing of speech and non-speech sounds in the supratemporal plane: Auditory input preference does not predict sensitivity to statistical structure. *Neuroimage*, 66C, 318-332.

Résultats (1): la région temporale supérieure discrimine la parole du chant.



Quelles aires cérébrales sont sensibles à l'apprentissage statistique?

Tremblay, P., Baroni, M., & Hasson, U. (2012). Processing of speech and non-speech sounds in the supratemporal plane: Auditory input preference does not predict sensitivity to statistical structure. *Neuroimage*, 66C, 318-332.



Résultats (2):

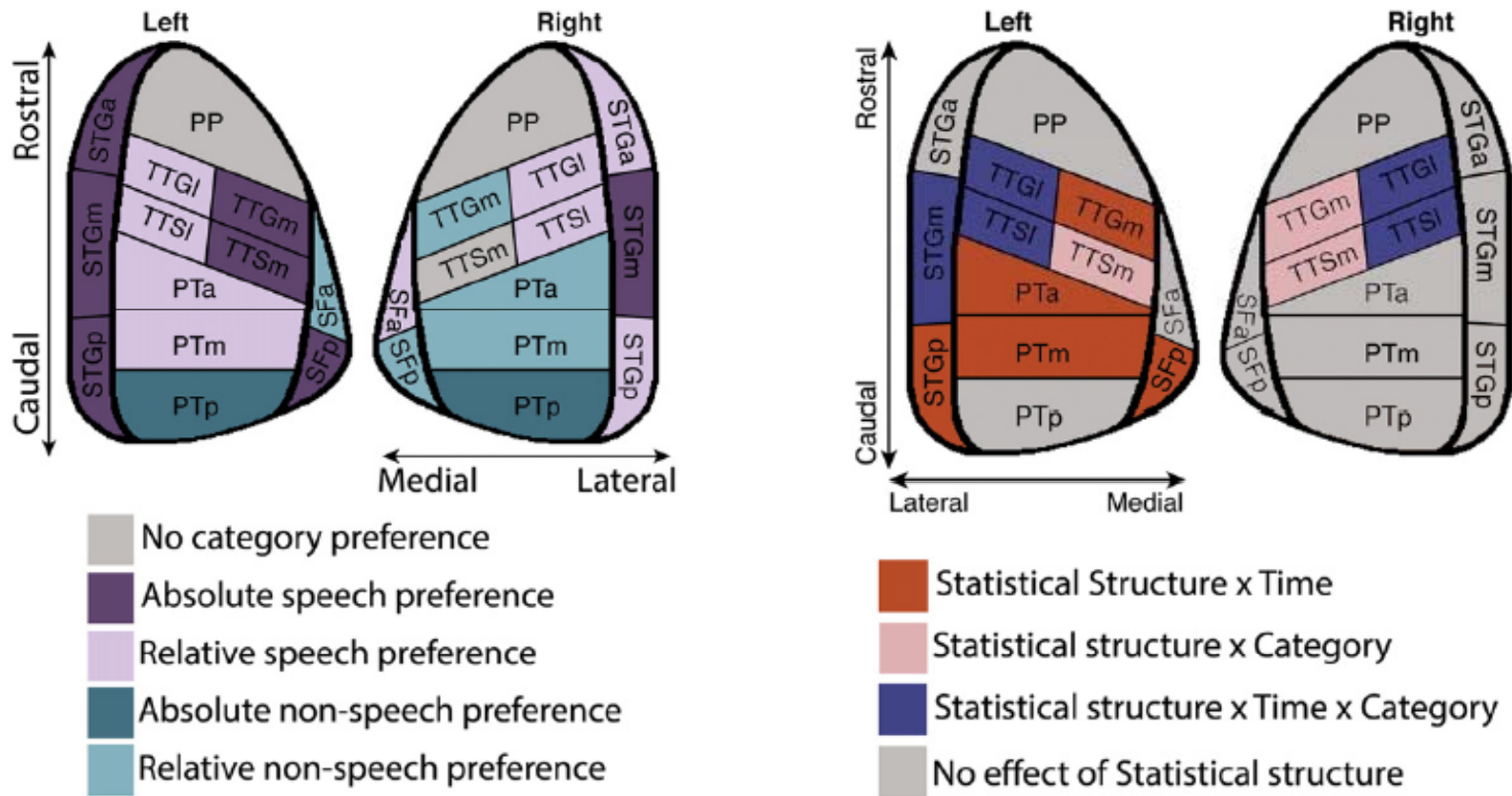
Plusieurs régions montrent une sensibilité à la structure statistique, qui s'établit avec le temps et qui, selon les régions, peut dépendre de la nature linguistique ou non des stimuli présentés:

- la partie postérieure de la région temporale supérieure montre un effet d'apprentissage indépendant de la catégorie.
- dans la partie antérieure, l'apprentissage interagit avec la catégorie (parole ou chant)

Quelles aires cérébrales sont sensibles à l'apprentissage statistique?

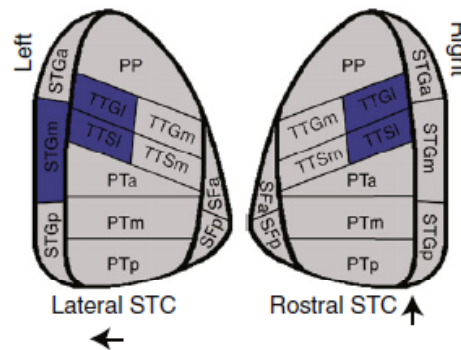
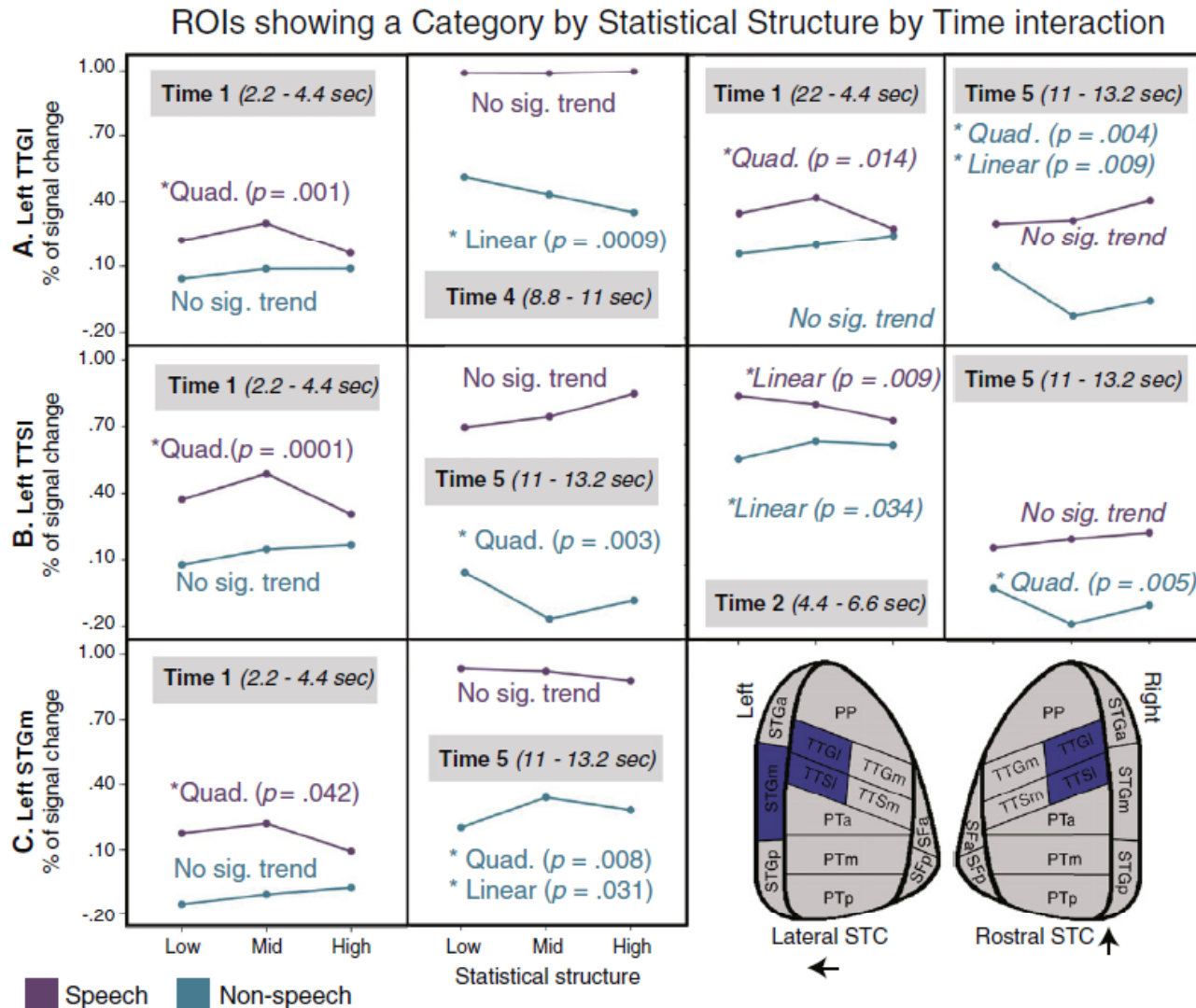
Ces résultats sont confirmés par une analyse en régions d'intérêt :

- il existe une spécialisation partielle ou totale pour la parole et le chant (peut-être due en partie à des différences physiques, y compris le spectre de fréquence)
- surtout, on observe des effets de la structure statistique, qui varie avec le temps et/ou la catégorie des stimuli.
- En particulier, le *planum temporale* montre une préférence pour le langage, mais un effet d'apprentissage pour les *deux* catégories



Quelles aires cérébrales sont sensibles à l'apprentissage statistique?

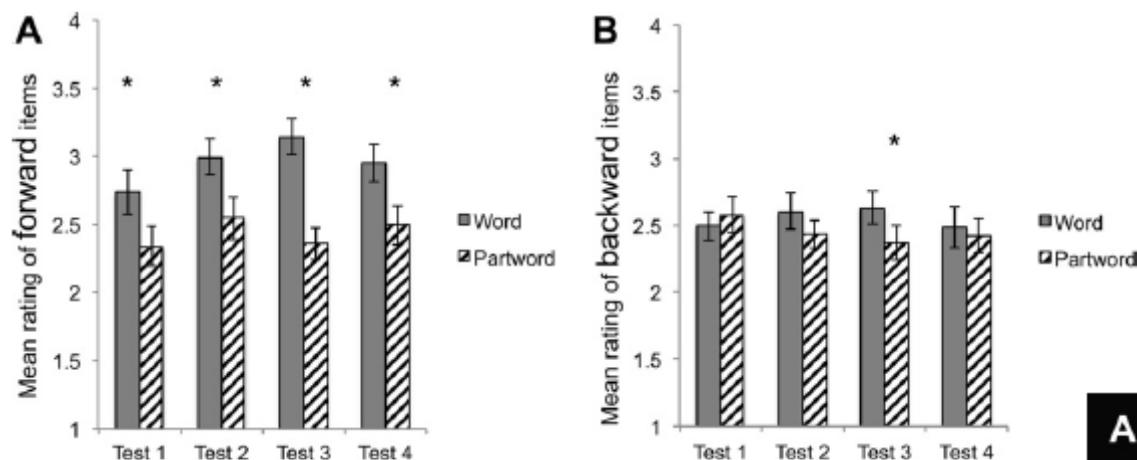
Tremblay, P., Baroni, M., & Hasson, U. (2012). Processing of speech and non-speech sounds in the supratemporal plane: Auditory input preference does not predict sensitivity to statistical structure. *Neuroimage*, 66C, 318-332.



L'activité des régions temporelles gauches augmente avec le temps, particulièrement pour le langage, mais parfois aussi pour le chant et ce particulièrement pour la condition la plus structurée. Le sillon temporal transverse semble spécialisé pour l'apprentissage d'un « lexique ». L'interprétation de ces résultats est complexe car le contenu exact de l'apprentissage n'est pas clair (transitions? mots?)

Le paradigme d'apprentissage statistique en IRM fonctionnelle

Karuz, E. A., Newport, E. L., Aslin, R. N., Starling, S. J., Tivarus, M. E., & Bavelier, D. (2013). The neural correlates of statistical learning in a word segmentation task: An fMRI study. *Brain and Language*.



Ecoute de structures trisyllabiques, jouées à l'endroit ou à l'envers (4 périodes de 2 minutes)
Le jugement de familiarité montre un apprentissage des « mots » présentés à l'endroit, mais pas de ceux présentés à l'envers.

Les régions temporales supérieures répondent mieux à la langue présentée à l'endroit (résultat classique).

Mais seule la région frontale inférieure gauche montre un accroissement d'activité au cours de l'apprentissage, sélectivement pour le langage à l'endroit.

Une analyse en régions d'intérêt montre des réponses similaires mais bilatérales dans le putamen et le noyau caudé.

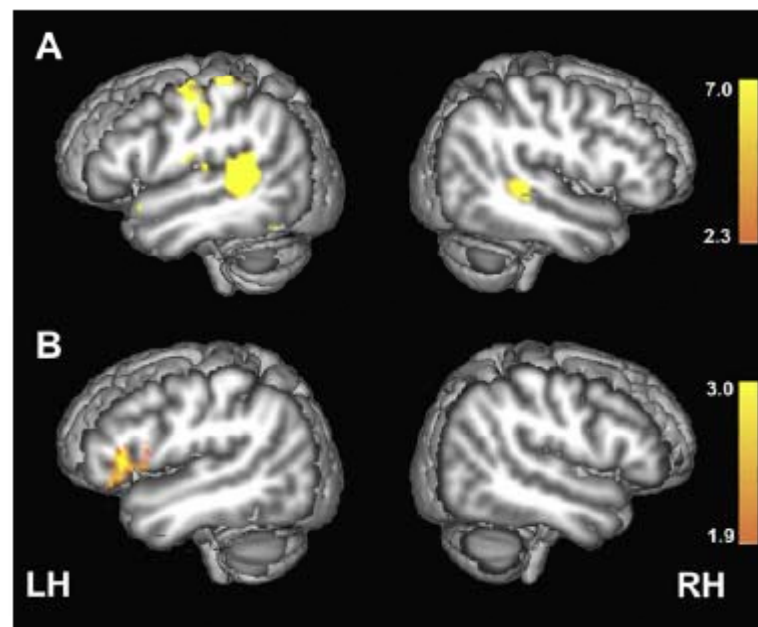


Fig. 4. Results of whole brain analysis with sagittal sections removed. (A) Mean activation in response to forward > backward continuous speech streams ($Z > 2.3$, $p < 0.05$). (B) Neural changes related specifically to learning in the left inferior frontal gyrus as revealed by a delta analysis performed on the contrast forward > backward ($Z > 1.9$, $p < 0.05$).

Conclusions



Dès quelques mois de vie, les bébés extraient les régularités statistiques de leur environnement linguistique:

- dernières semaines de grossesse: voix de la mère, prosodie, voyelles?
- 5 mois: prénom, noms familiers
- 6 mois: voyelles
- 6 à 8 mois: segmentation de mots
- 9 à 12 mois: consonnes
- 12 mois: séquences de mots

Chez l'enfant, les aires cérébrales impliquées ne sont pas connues.

Chez l'adulte, diverses aires temporales et frontales inférieures sont impliquées. Sans doute faut-il distinguer différents contenus de l'apprentissage:

- phonologie et phonotactique (*planum temporale?*)
- lexique (sillon temporal transverse?)
- règles linguistiques (région frontale inférieure gauche?)