

Mécanismes cérébraux de la lecture

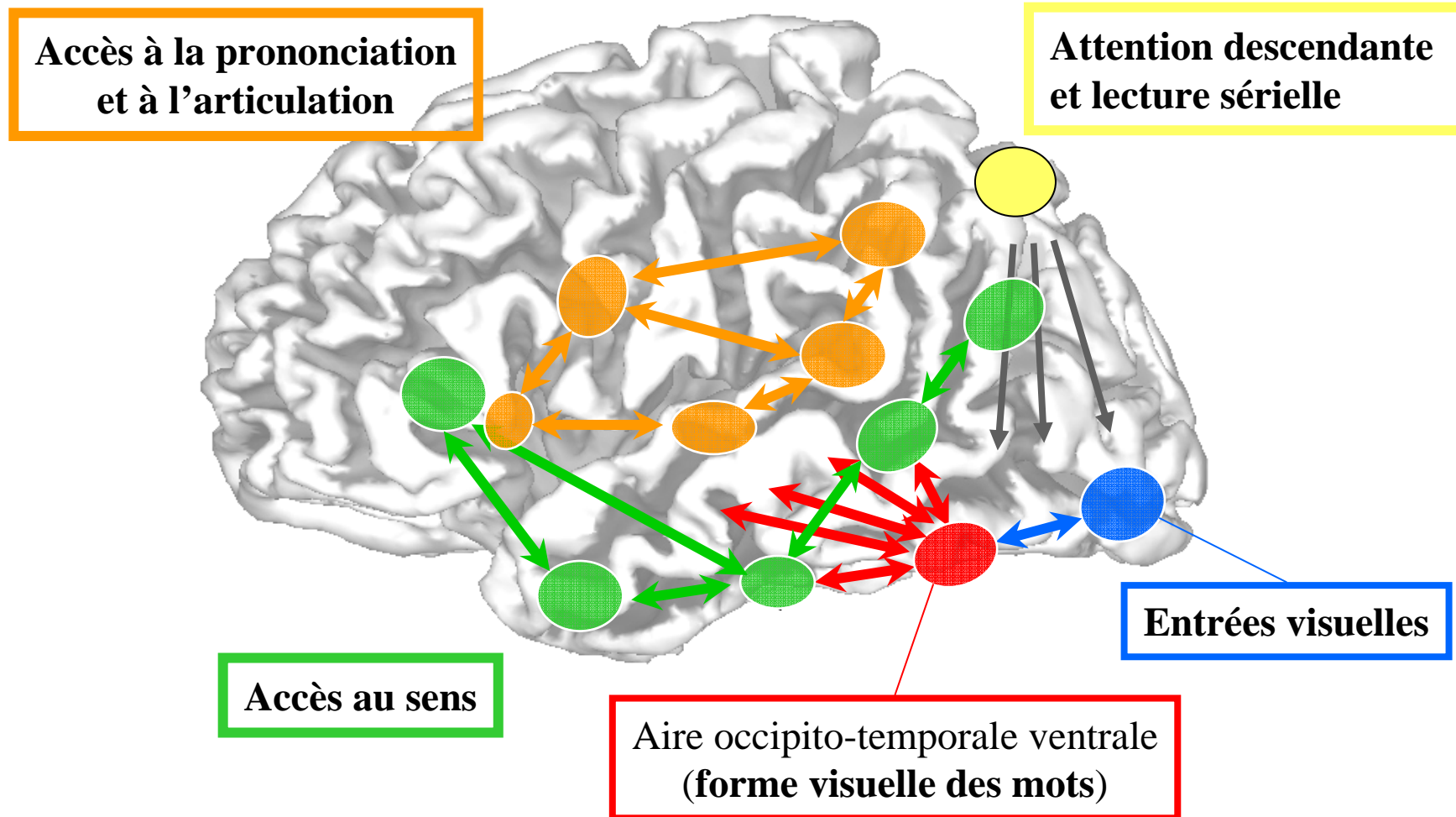
Stanislas Dehaene
Chaire de Psychologie Cognitive Expérimentale

Sixième Cours

Les mécanismes cérébraux
de l'apprentissage de la lecture et de la dyslexie

Résumé: Plusieurs routes de lecture

- La région occipito-temporale gauche semble servir de « voie d'entrée » visuelle de la lecture
- Trois autres grands réseaux semblent ensuite être impliqués:

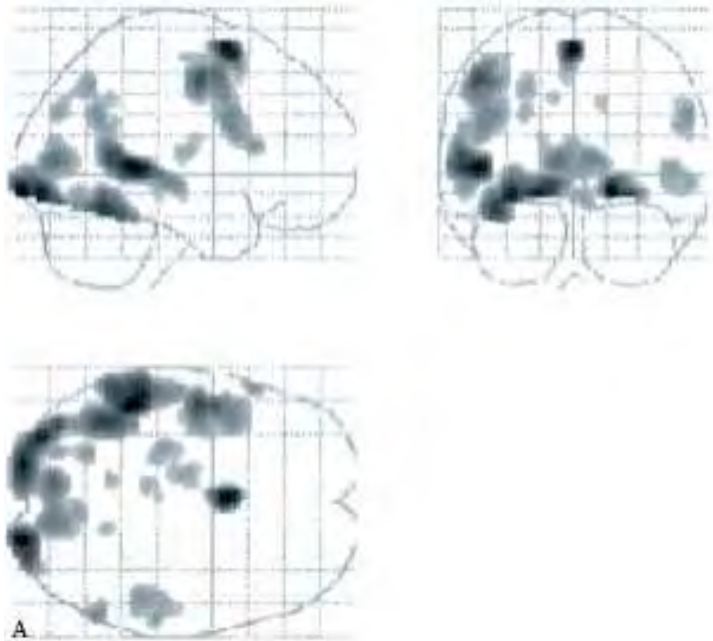


Les trois grandes étapes de l'apprentissage de la lecture (Frith, 1985)

- Etape logographique ou picturale
 - Mémorisation de la forme de quelques mots
 - Pseudo-lecture, variable d'un enfant à l'autre, sans généralisation
- Etape phonologique
 - Mise en place de la voie de conversion graphème-phonème
 - Caractéristiques: effet de longueur et de complexité syllabique
 - Emergence de la conscience phonologique (réduite chez les illettrés)
 - Les scores phonologiques prédisent les scores de lecture
- Etape orthographique
 - Expertise pour l'orthographe d'une langue
 - Disparition progressive de l'effet de longueur
 - Apparition des effets morphémiques et lexicaux
- Prédications au niveau neurophysiologique:
 - Activation initialement dispersée dans les régions occipito-temporales bilatérales, et indifférenciées pour mots versus images de contrôle
 - Concentration progressive de l'activation dans la région occipito-temporale gauche

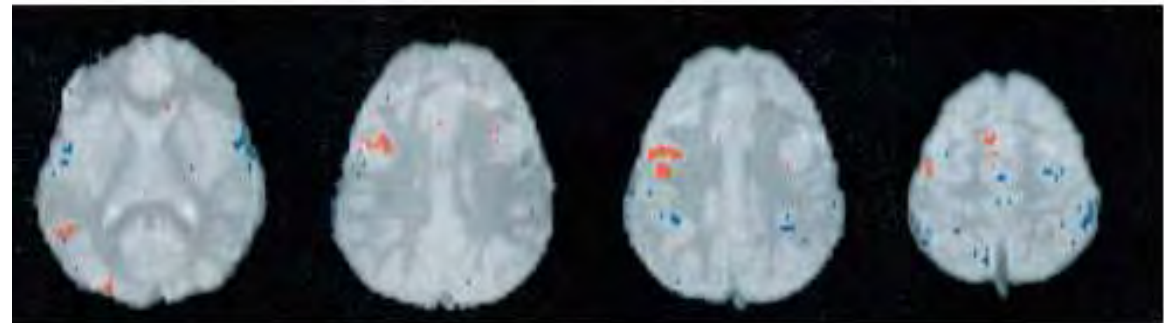
Imagerie cérébrale de la lecture chez l'enfant

Le réseau de base est déjà en place et peut être visualisé chez l'enfant de 7 ans
(Gaillard et al., *Neurology* 2003)

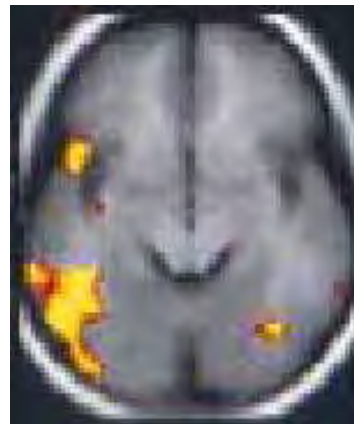


En groupe

Chez un enfant particulier



L'activation visuelle semble s'accroître et se focaliser progressivement vers la région occipito-temporale gauche entre 6 et 10 ans.

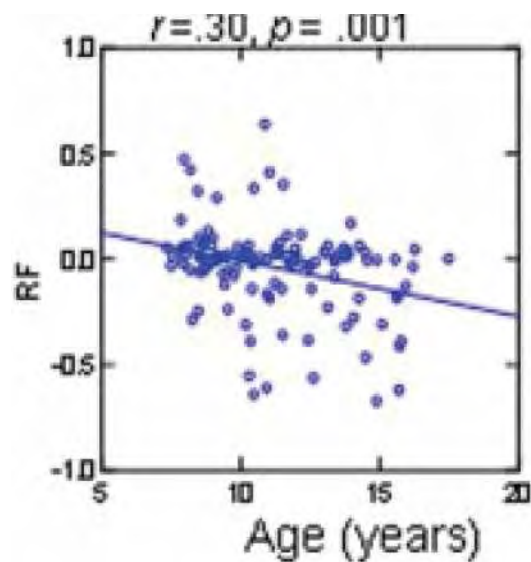
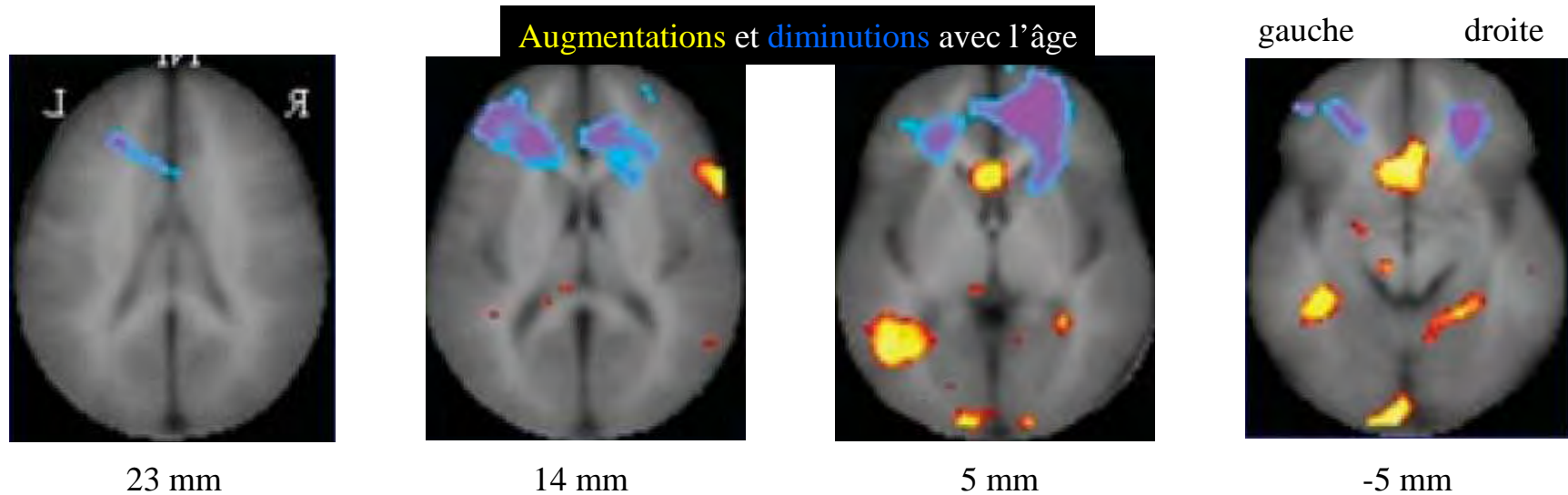


La quantité d'activation occipito-temporale gauche prédit les scores de lecture.

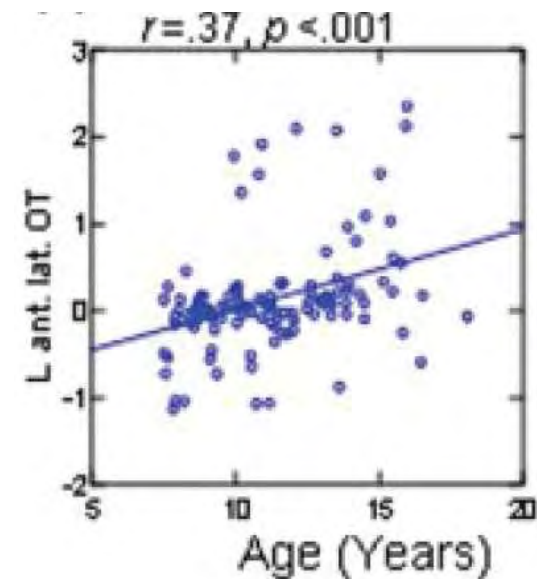
Shaywitz et al. (2002) *Biol. Psychiatry*

L'activité de la région occipito-temporale gauche augmente avec l'âge au cours du développement

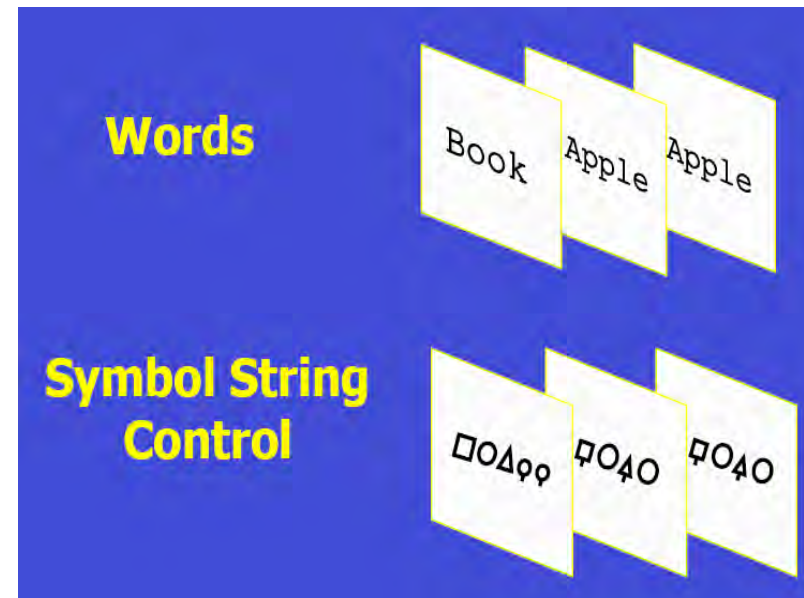
Shaywitz, B. A., et al. (2007). Age-related changes in reading systems of dyslexic children. *Ann Neurol*, 61(4), 363-370.



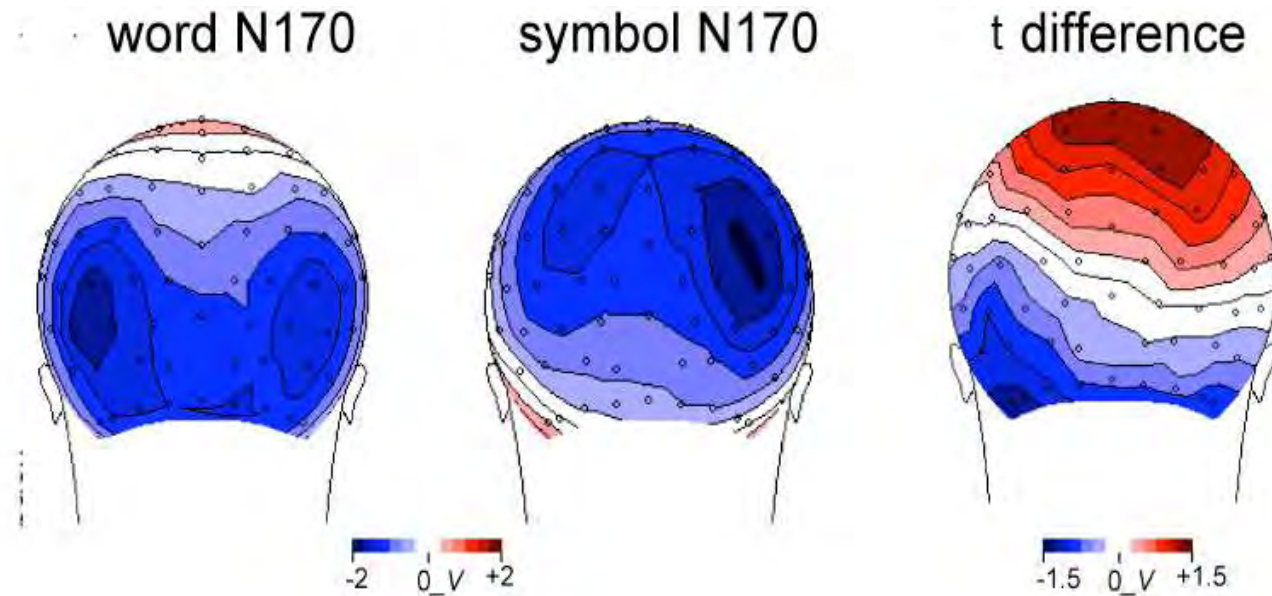
- 119 enfants normaux entre 7 et 18 ans
- jugement de rime
- Augmentation dans la région occipito-temporale gauche
- Diminution dans les régions préfrontales



Développement de l'onde N170 en potentiels évoqués

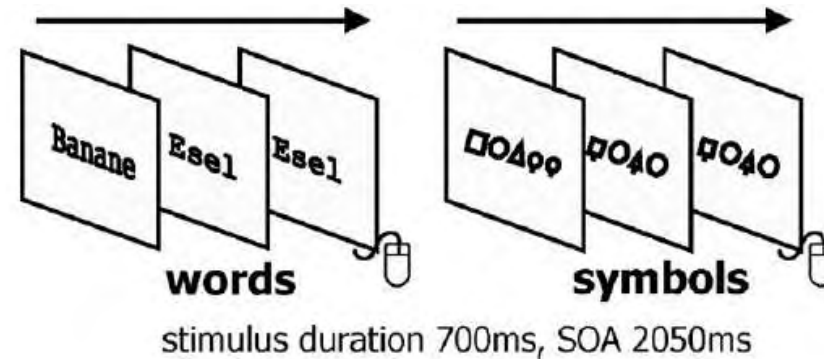


Résultats de Maurer, Brandeis & McCandliss (2005) chez de jeunes **adultes** américains

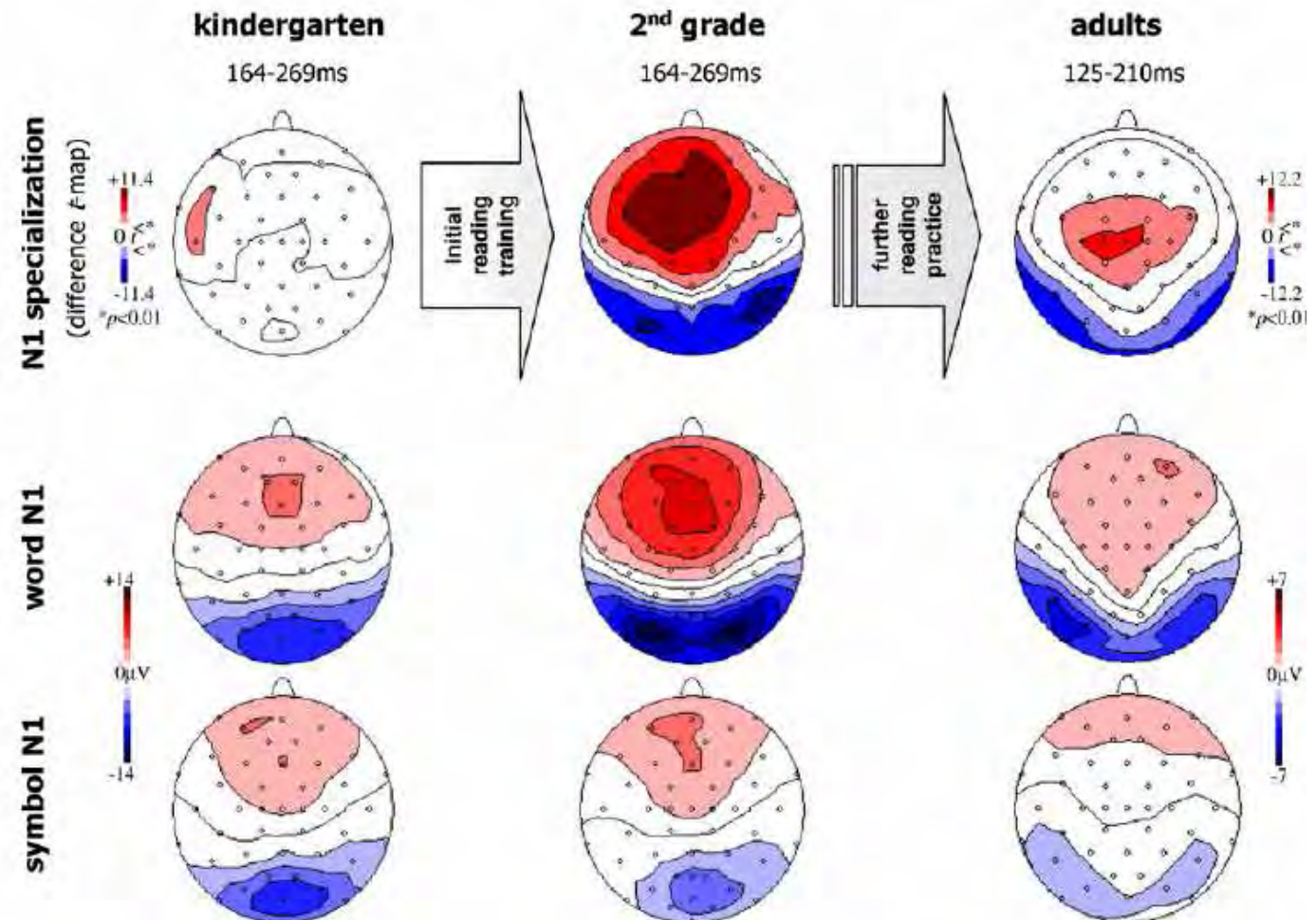


Développement de l'onde N170 en potentiels évoqués

(Maurer et al. *NeuroImage* 2006)



- Tâche de détection de répétition immédiate (« one-back task »)
- Mots ou symboles sans signification
- Pas de différence avant l'apprentissage de la lecture, puis forte réponse bilatérale aux mots
- La courbe de développement est non-linéaire
- Elle suggère une focalisation progressive vers la région occipito-temporale gauche, associée à une spécialisation

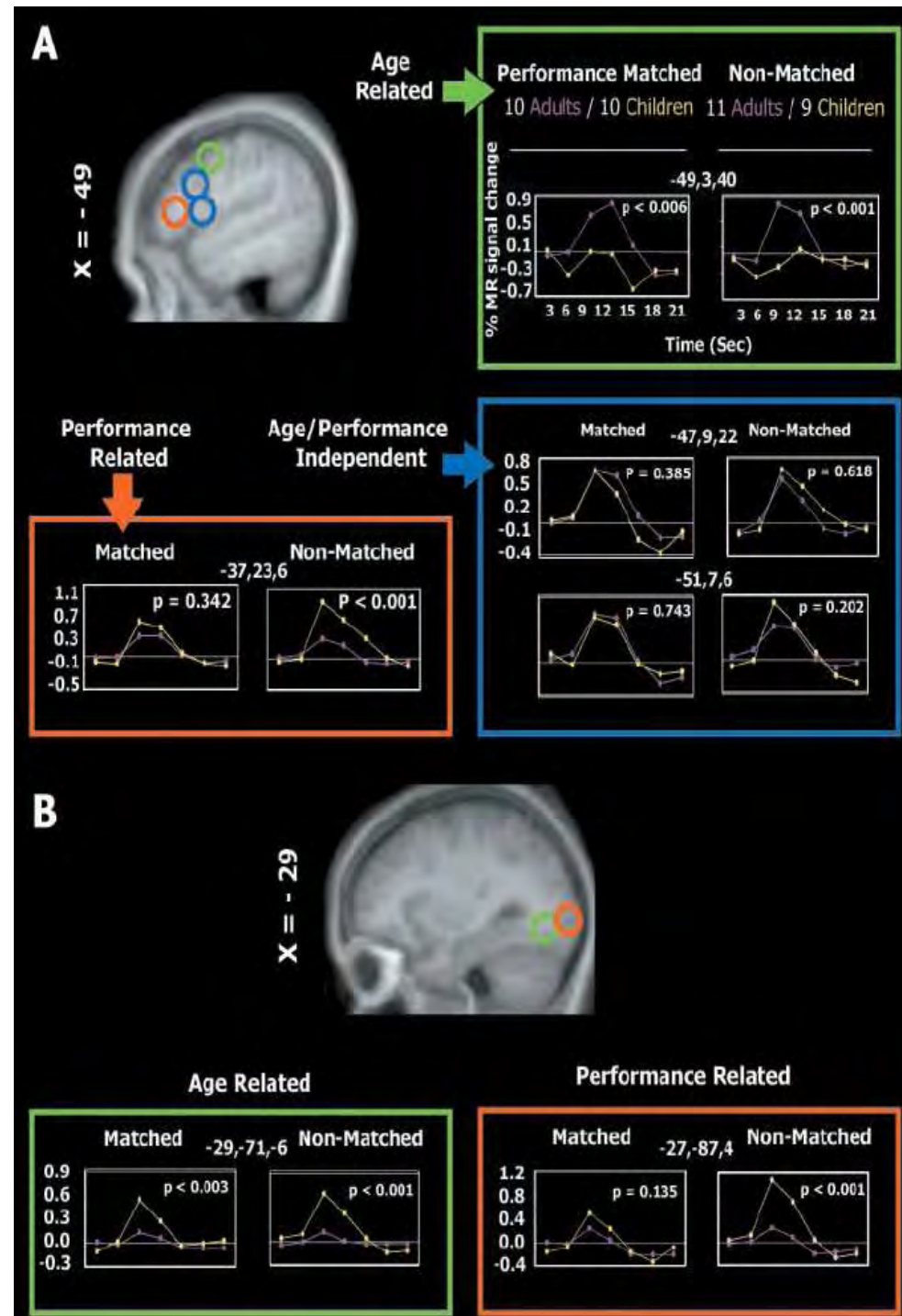


Il importe de séparer l'âge et les changements de performance

Schlaggar et al. with Petersen (2002). Functional neuroanatomical differences between adults and school-age children in the processing of single words. *Science*, 296(5572), 1476-1479.

	Children		Adults	
	Non-Matched	Matched	Matched	Non-Matched
n	9	10	10	11
gender	5 f / 4 m	5 f / 5 m	4 f / 6 m	7 f / 4 m
age	9.38	9.22	24.49	25.93
% correct	80.78	81.11	92.06	98.12
RT (msec)	2388	1481	1326	1222
Verbal IQ	118	125	---	---
Performance IQ	113	115	---	---
Full Scale IQ	120	123	---	---

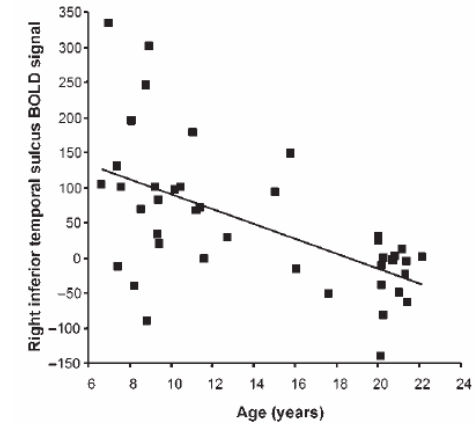
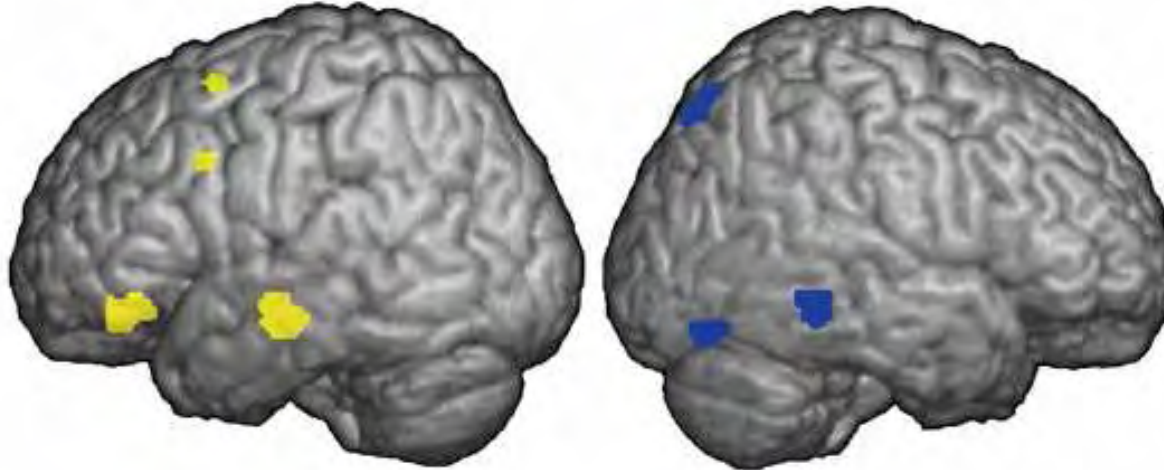
- 19 enfants d'âge moyen 9 ans
- génération de verbes associés à un mot
- répartition des sujets en groupes presque appariés pour les performances.
- Augmentation liée à l'âge dans une région préfrontale et diminution dans une région occipito-temporale mésiale



Résultats superficiellement différents de l'étude de Turkeltaub et al.

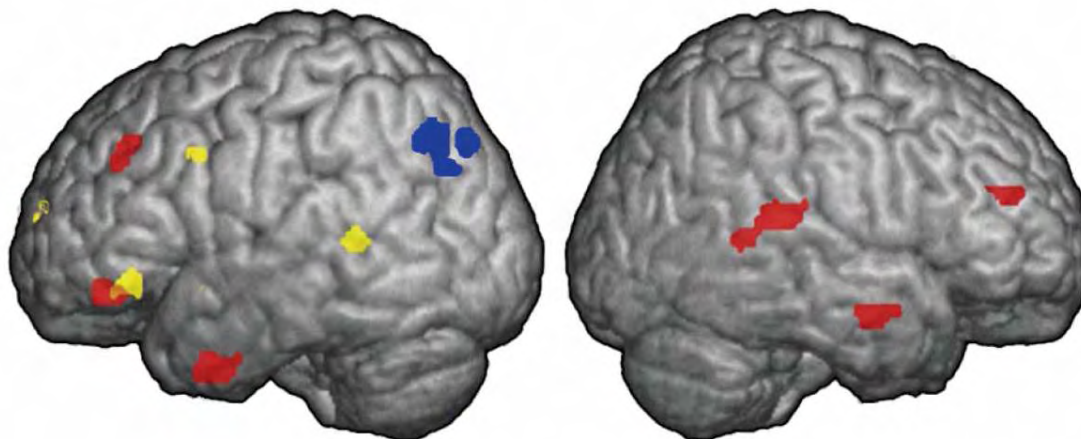
(*Nature Neuroscience*, 2003; 41 enfants de 6 à 20 ans; lecture implicite [détection de lettres ascendantes])

Augmentations et **diminutions** avec l'âge



- Les résultats peuvent s'expliquer par l'utilisation d'une tâche implicite, qui révèle l'automatisme de la lecture
- Le développement semble continuer même après l'adolescence.
- De nombreuses autres régions montrent une activation corrélée à différents aspects de la lecture:

Corrélations avec divers scores liés à la lecture



- Conscience phonémique
- Dénomination rapide
- Mémoire de travail phonologique

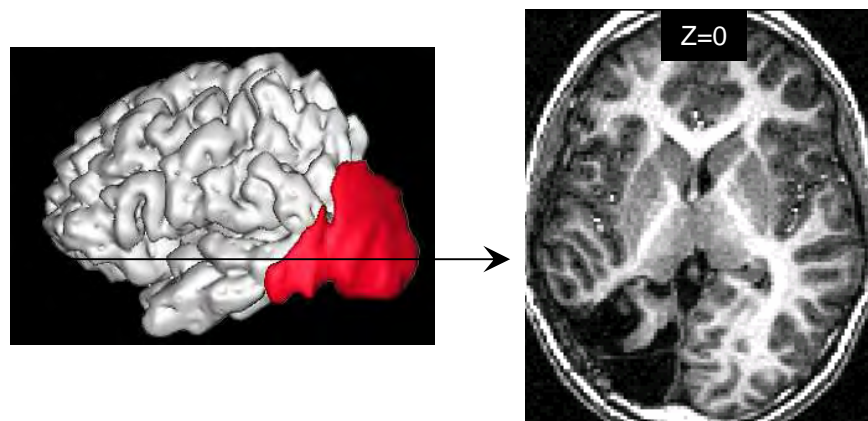
Plasticité cérébrale:

La région de la forme visuelle des mots n'est pas irremplaçable

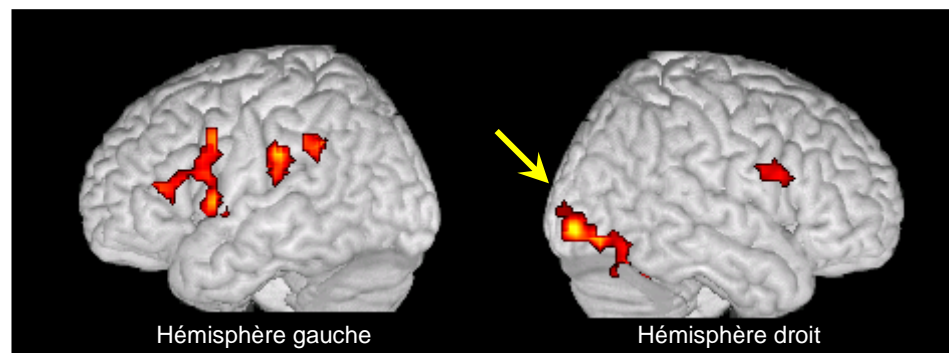
Cohen, L., Lehericy, S., Henry, C., Bourgeois, M., Larroque, C., Sainte-Rose, C., et al. (2004). Learning to read without a left occipital lobe: right-hemispheric shift of visual word form area. *Ann Neurol*, 56(6), 890-894.

Développement quasi-normal de la lecture chez une jeune fille opérée à 4 ans de la région occipito-temporale gauche (maladie de Sturge-Weber)

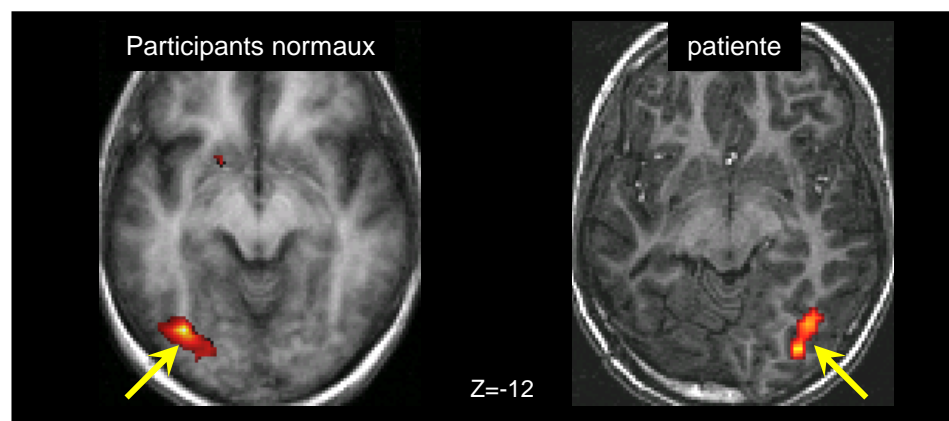
Lésion chirurgicale pratiquée à l'âge de 4 ans



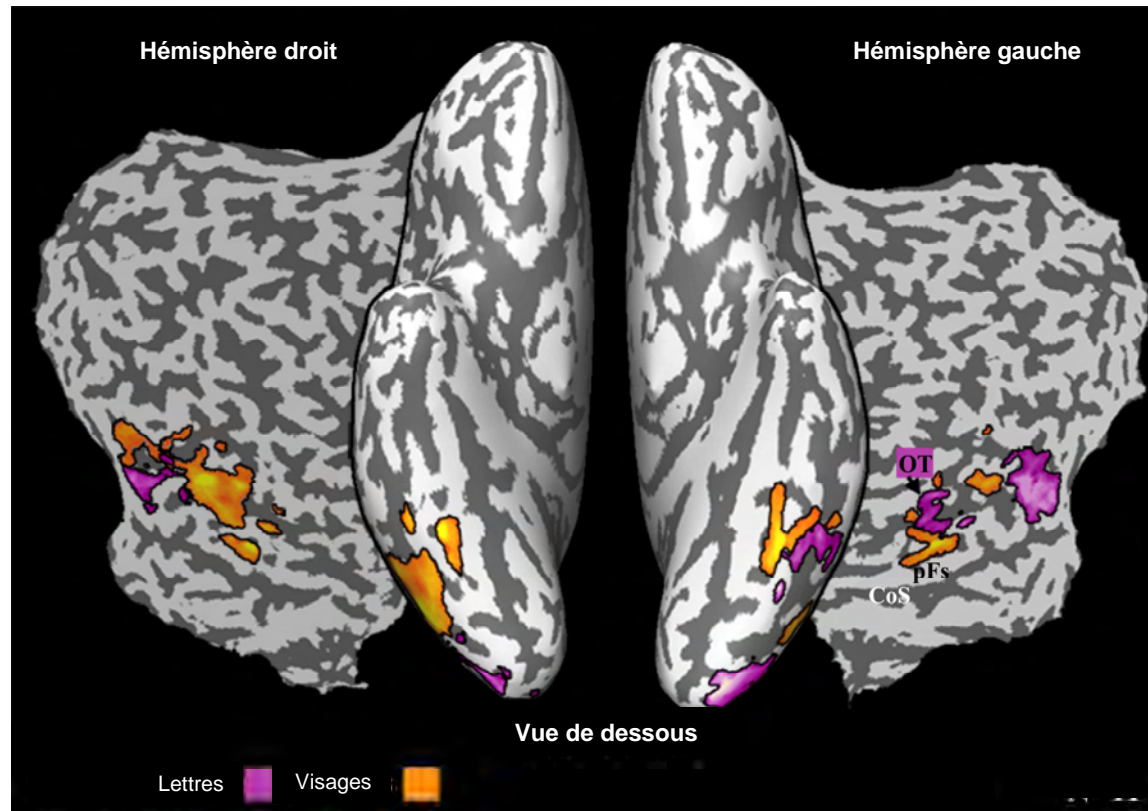
Réseau de la lecture observé à l'âge de 11 ans



Inversion de l'aire de la forme visuelle des mots



Pourquoi une localisation reproductible de la lecture?
Intersection de gradients qui créent des biais de préférence corticale
vraisemblablement d'origine génétique (Morphogènes de Turing?)

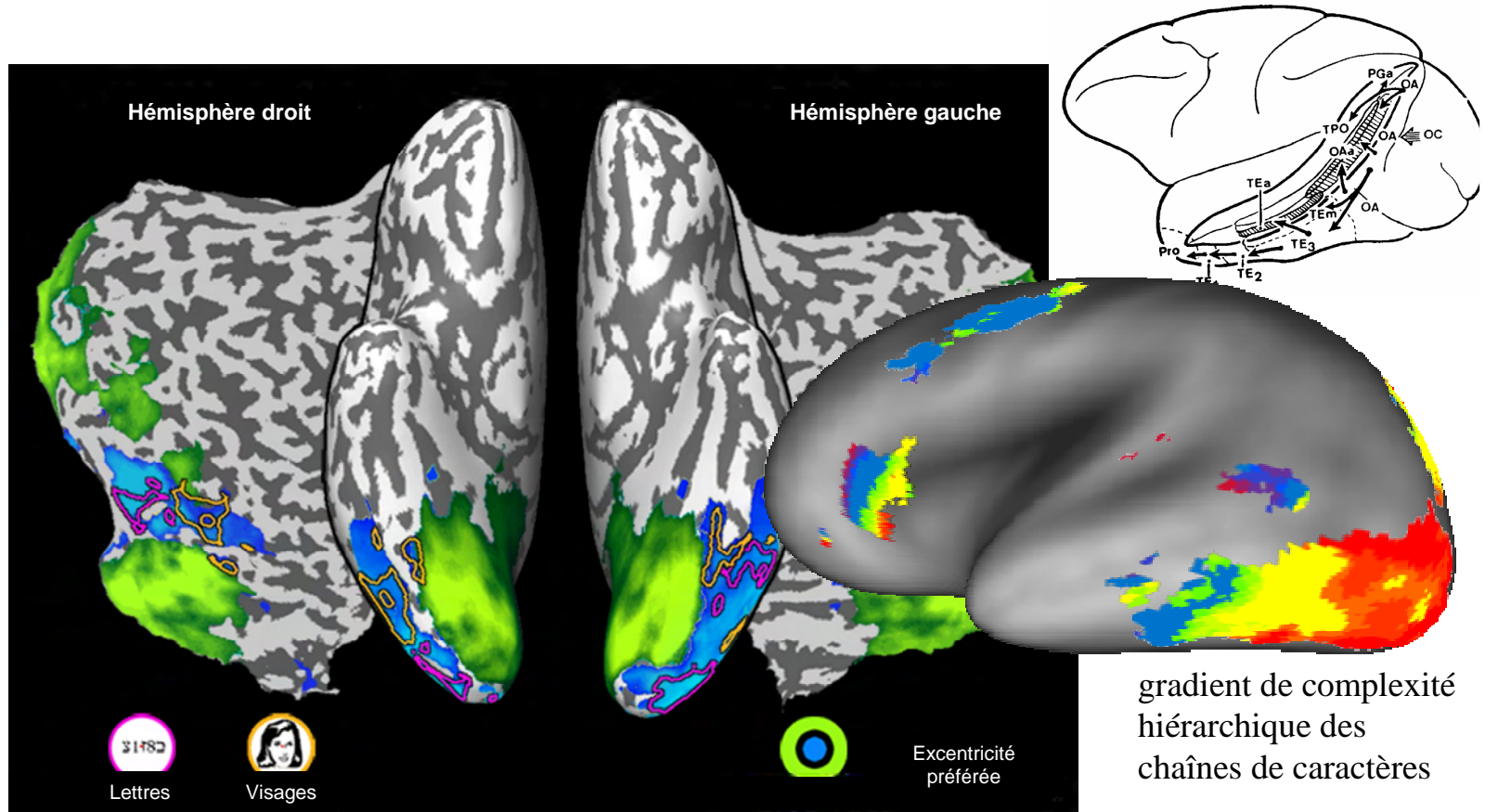


- Localisation des régions sensibles aux visages et aux mots

Hasson, U., Levy, I., Behrmann, M., Hendler, T., & Malach, R. (2002). Eccentricity bias as an organizing principle for human high-order object areas. *Neuron*, 34(3), 479-490.

Pourquoi une localisation reproductible de la lecture?

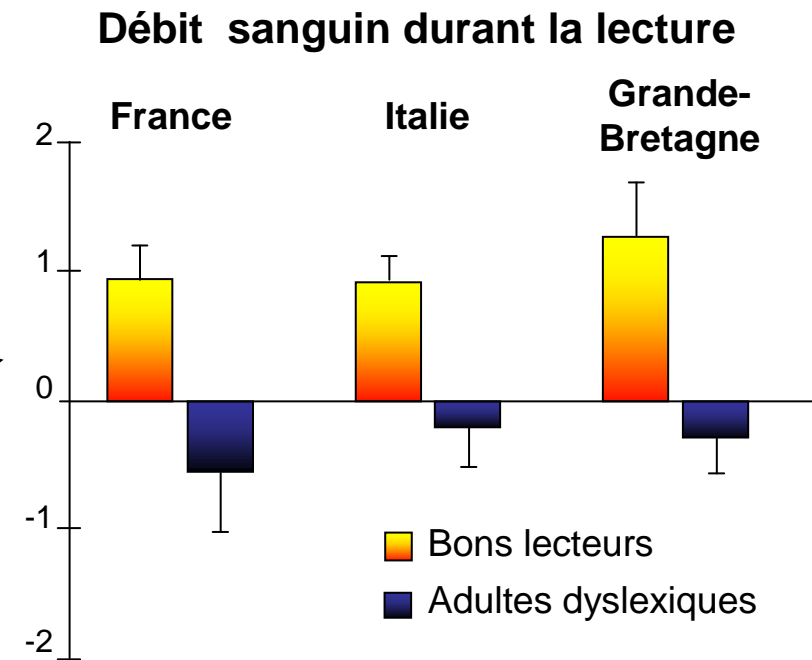
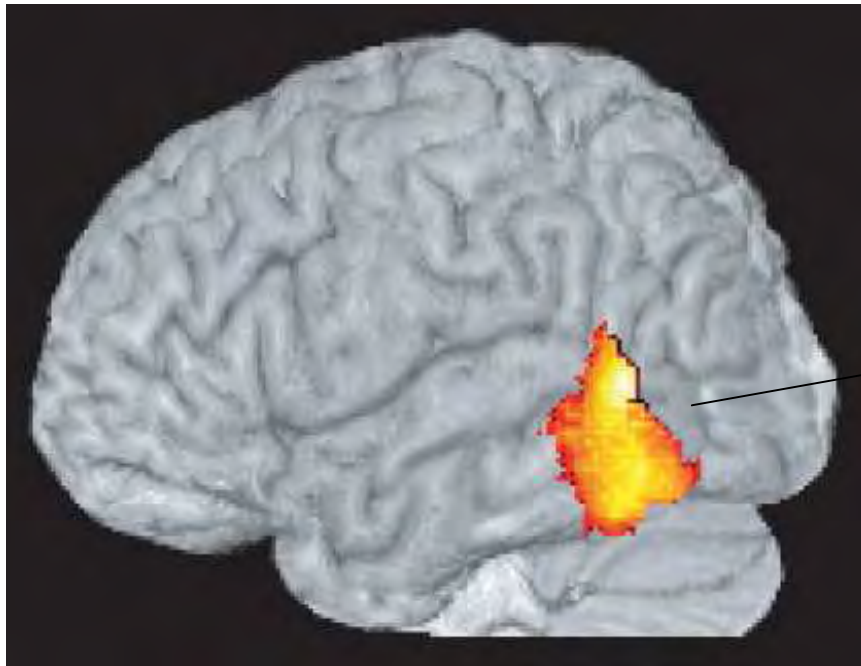
Intersection de gradients qui créent des biais de préférence corticale vraisemblablement d'origine génétique (Morphogènes de Turing?)



- Localisation des régions sensibles aux visages et aux mots
- Superposition de ces régions avec un vaste gradient de préférence pour l'excentricité des images
- La position de l'aire de la forme visuelle des mots pourrait être déterminée par l'intersection de ce gradient avec
 - un second gradient, antéro-postérieur, de complexité des champs récepteurs
 - un troisième axe de préférence gauche-droite, lié soit au langage, soit à un style de traitement visuel (holistique/analytique)

Mécanismes cérébraux de la dyslexie

Paulesu, E., Demonet, J. F., Fazio, F., McCrory, E., Chanoine, V., Brunswick, N., et al. (2001).
Dyslexia: cultural diversity and biological unity. *Science*, 291(5511), 2165-2167.



- 18 dyslexiques adultes dans trois pays (France, Italie, Grande-Bretagne). Les dyslexiques anglais et français ont été diagnostiqués comme tels. Les dyslexiques italiens ont été identifiés parmi 1200 étudiants en fonction de leurs résultats à divers tests de rapidité de lecture, de dénomination, etc.
- Etude en caméra à positons, tâches de lecture explicite (à haute voix) et implicite (détection de lettres ascendantes)

Convergence des résultats de plusieurs études

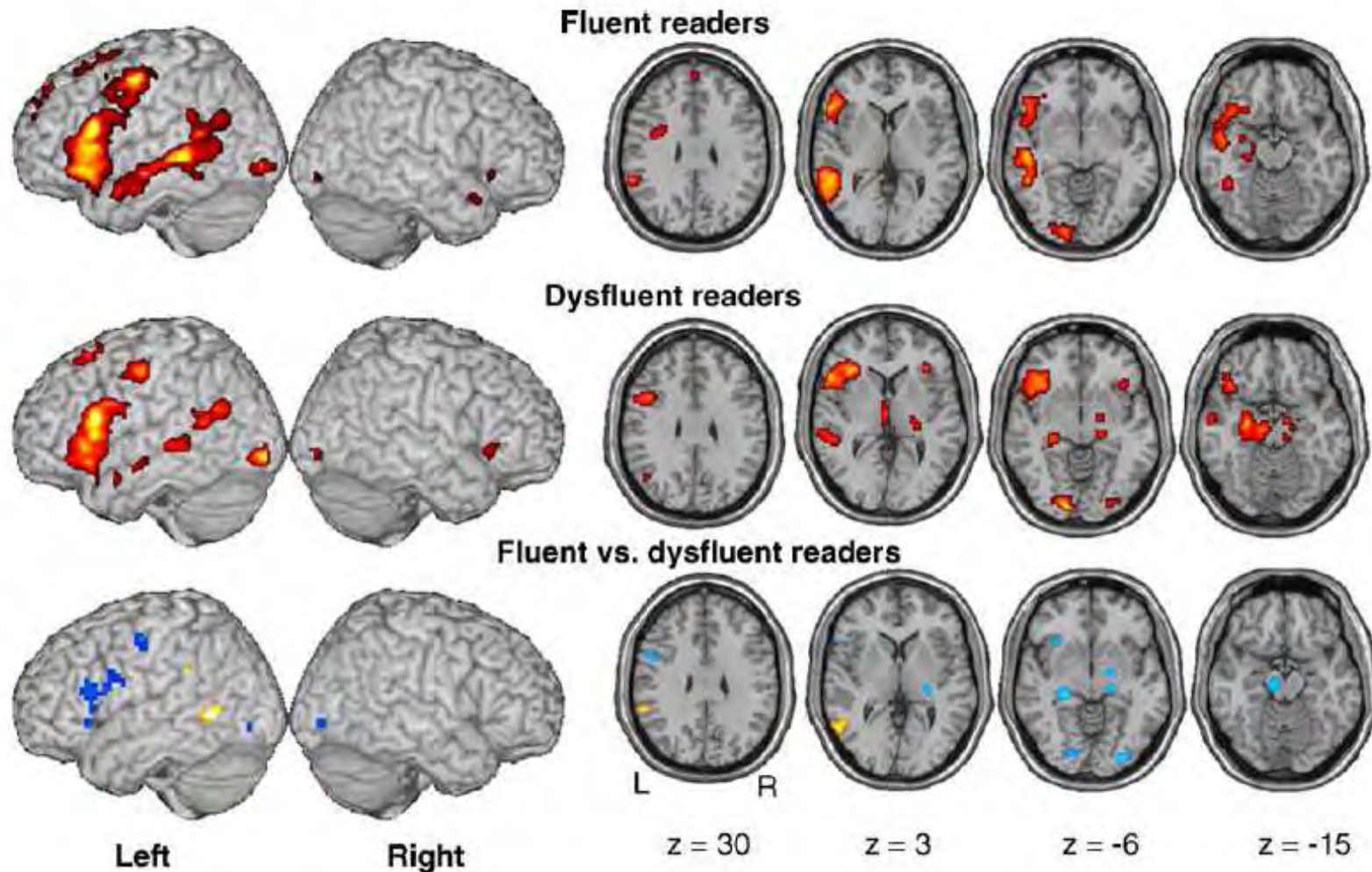
Par exemple dans cette étude récente chez des adolescents allemands

-hypo-activation temporelle gauche

-également hypo-activation pariétale inférieure gauche

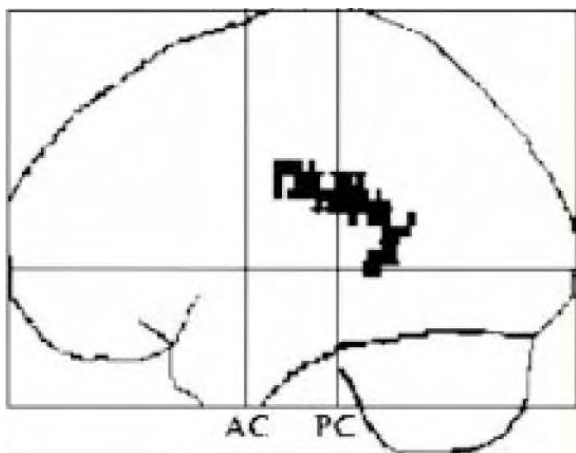
-hyper-activation frontale inférieure gauche

M. Kronbichler et al. / Neuropsychologia 44 (2006) 1822–1832

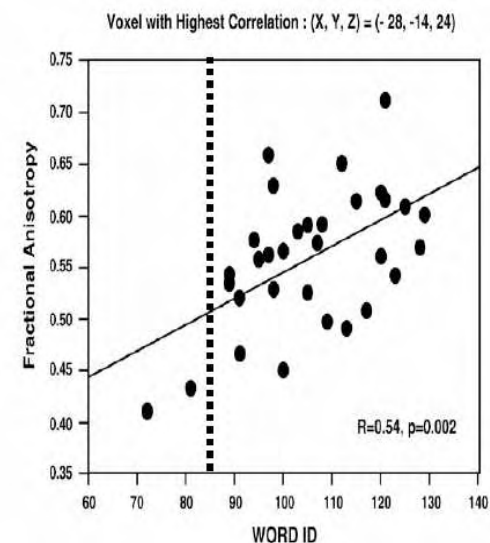
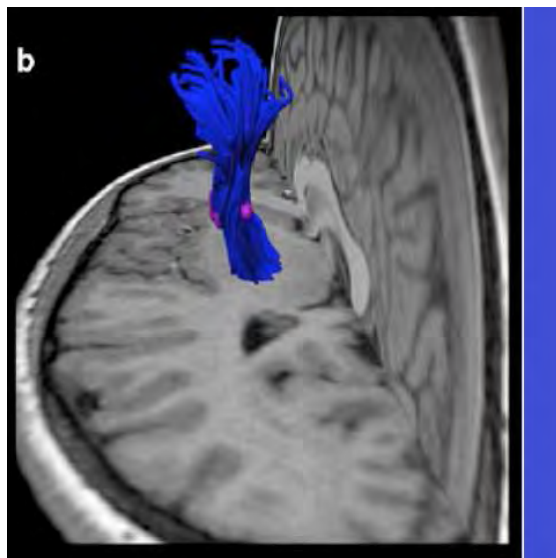


Anomalies structurales: imagerie du tenseur de diffusion

Klingberg et al., 2000

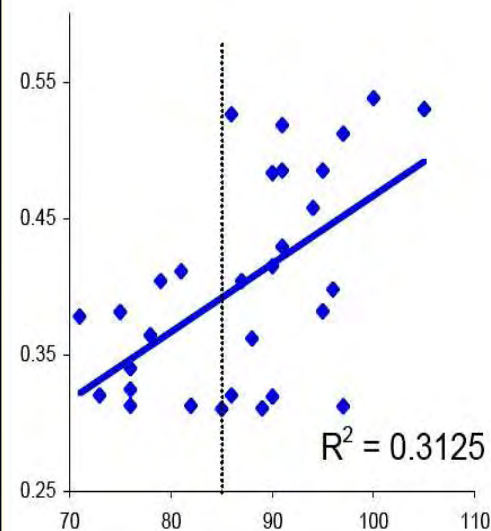
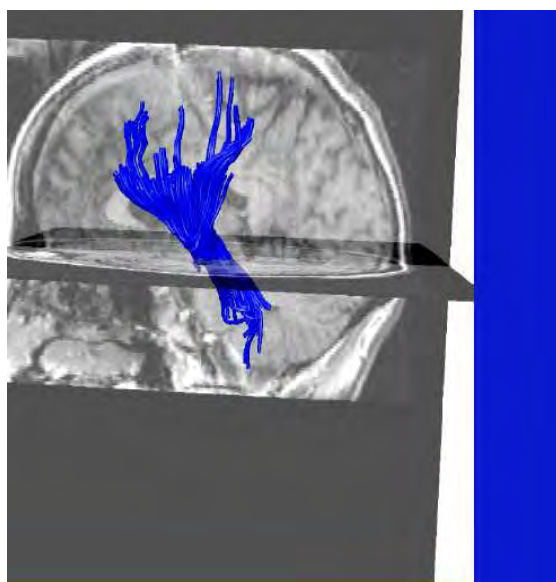


Beaulieu et al., 2005



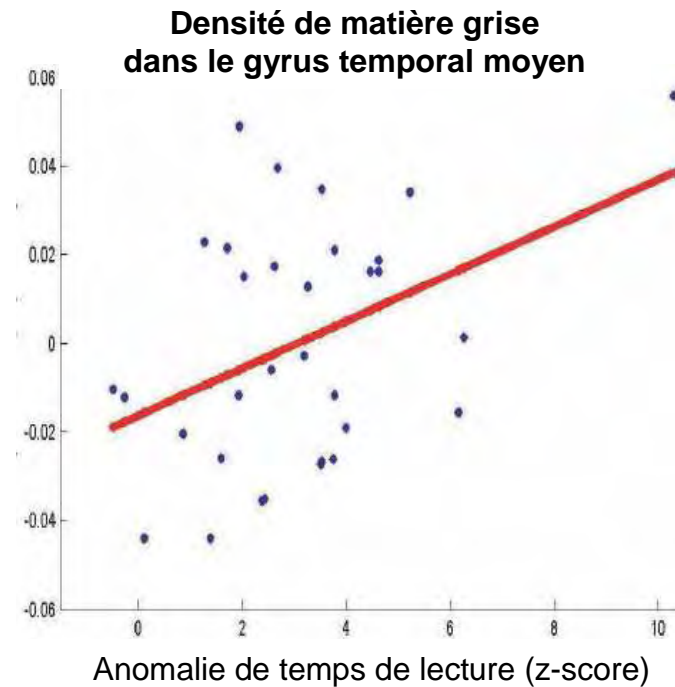
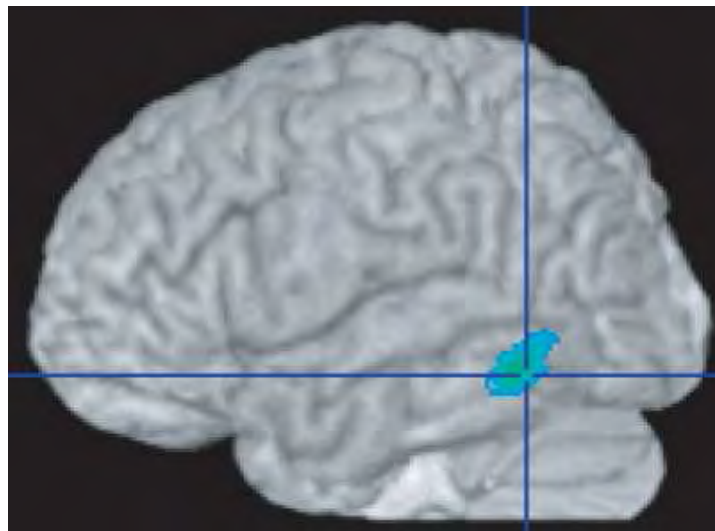
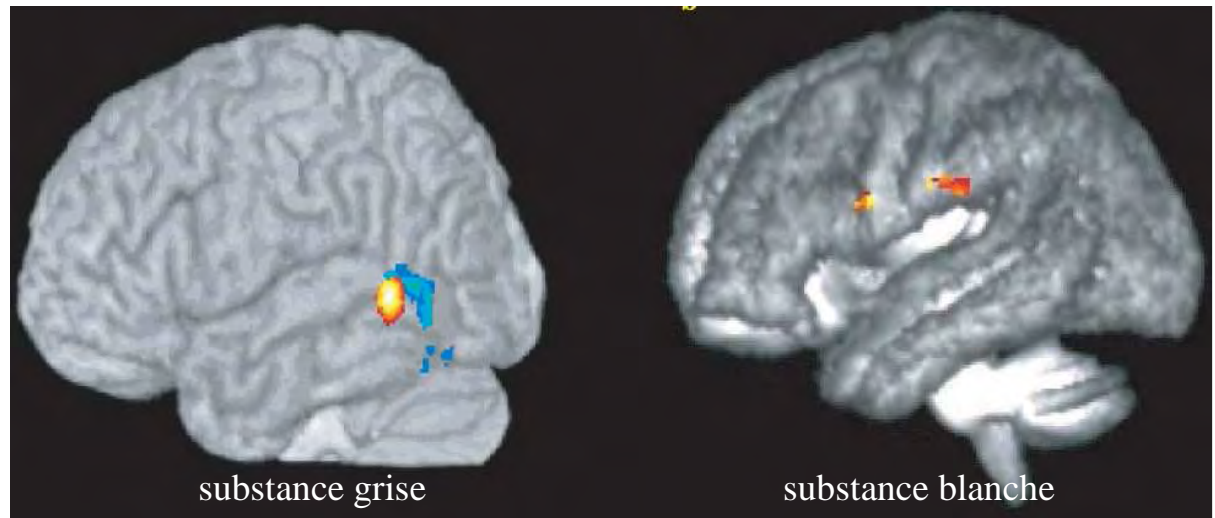
- Reproductibilité remarquable des études, qui pointent toutes vers une anomalie de la substance blanche en deçà de la région temporo-pariétale gauche, corrélée au déficit de lecture
- Mais difficultés d'interprétation:
 - s'agit-il d'un faisceau longitudinal ou vertical (*corona radiata*)?
 - s'agit-il d'une cause ou d'une conséquence de la dyslexie?

Niogi & McCandliss, 2006



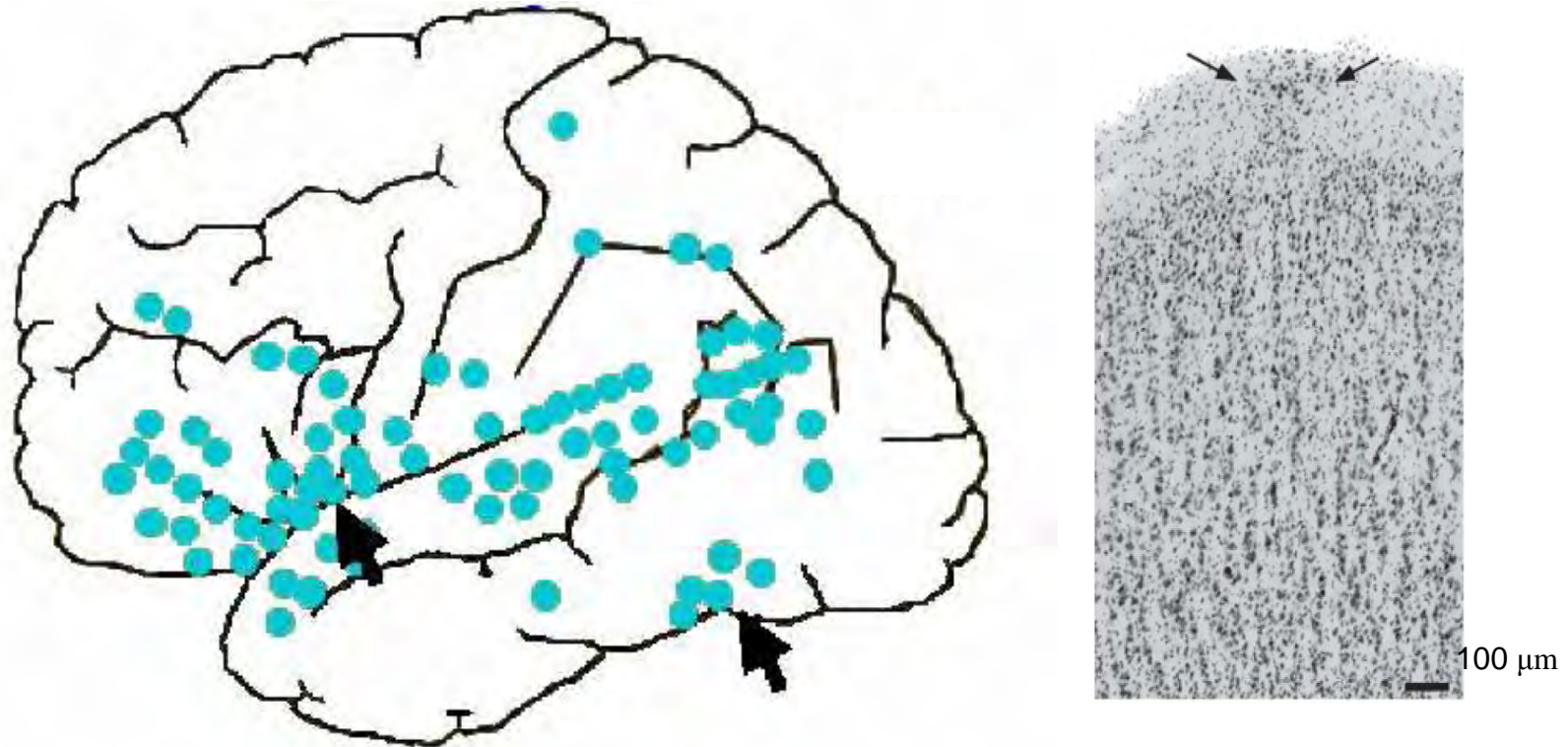
Anomalies structurales: morphométrie quantitative

- Analyse par « voxel-based morphometry » de l'anatomie des sujets de l'étude de Paulesu et al.
- Augmentation** de matière grise, précisément en regard des régions sous-activées, corrélée avec l'anomalie des scores de lecture



Silani, G., Frith, U., Demonet, J. F., Fazio, F., Perani, D., Price, C., et al. (2005). Brain abnormalities underlying altered activation in dyslexia: a voxel based morphometry study. *Brain*, 128(Pt 10), 2453-2461.

Anomalies structurales: analyses post-mortem et génétique



•Galaburda, A. M., Sherman, G. F., Rosen, G. D., Aboitiz, F., & Geschwind, N. (1985). Developmental dyslexia: four consecutive patients with cortical anomalies. *Ann Neurol*, 18(2), 222-233.

Anomalies de migration neuronale distribuées, particulièrement dans les régions périsylviennes de l'hémisphère gauche (ectopies, dysplasies).

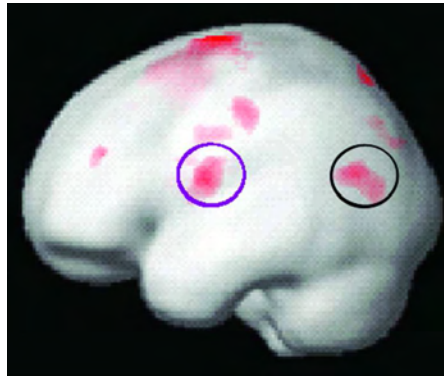
•Galaburda, A. M., LoTurco, J., Ramus, F., Fitch, R. H., & Rosen, G. D. (2006). From genes to behavior in developmental dyslexia. *Nat Neurosci*, 9(10), 1213-1217.

Au moins 4 gènes candidats, trois d'entre eux (KIAA0319, DCDC2 et DYX1C) affectent la migration neuronale (travaux de Joe Lo Turco; cf. séminaire de Sylvia Paracchini), le quatrième (ROBO1) contrôle le cheminement axonal.

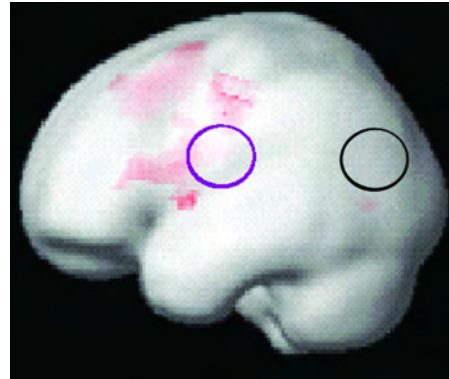
Les anomalies d'activation fonctionnelle ne sont pas immuables

Etudes par IRMf de protocoles de ré-éducation

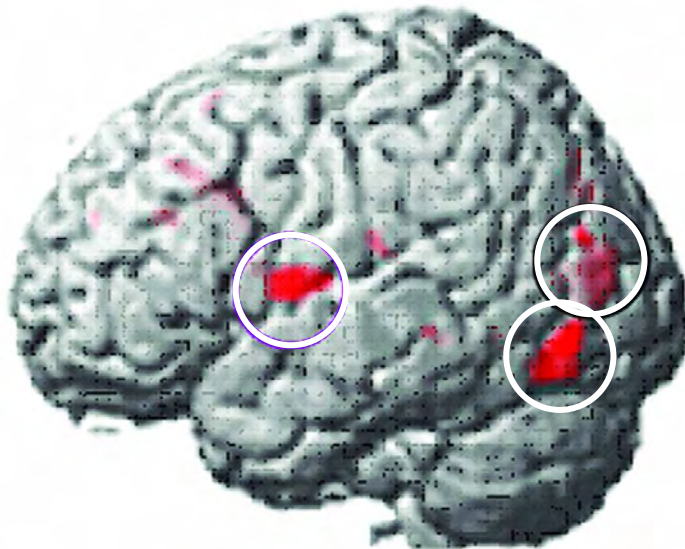
Enfants normaux



Dyslexiques avant l'entraînement



Différence avant-après entraînement



Résultats de Temple et al. (*PNAS*, 2003):

- Dyslexiques traités avec le logiciel « FastForWord », comparés à un groupe de sujets normaux scannés deux fois (contrôle peu approprié)
 - Tâche de jugement de rime sur des paires de lettres
 - Augmentation d'activation dans des régions proches de celles initialement sous-activées, ainsi que dans des régions temporales et frontales droites
- restauration et compensation

Logique similaire de l'étude d'Eden et al. (*Neuron*, 2004):
Augmentations d'activation dans une tâche de manipulation phonologique sur entrée auditive



Le recyclage neuronal peut-il expliquer certaines difficultés d'apprentissage?

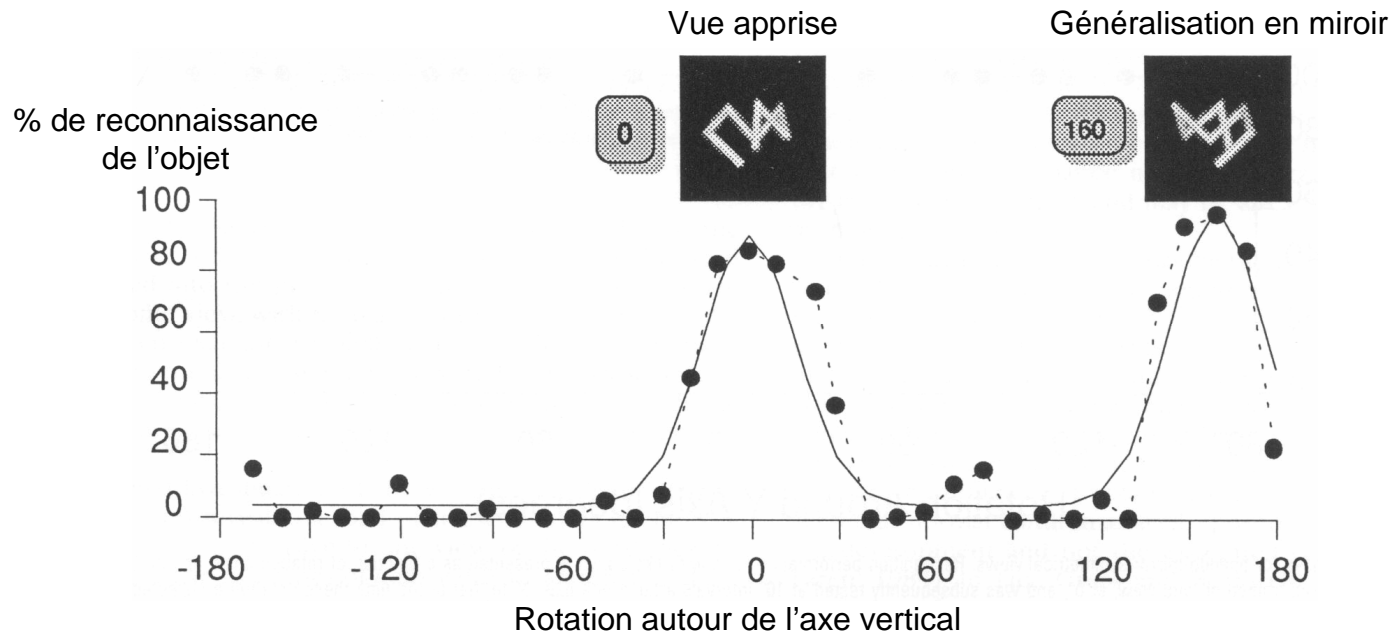
Le cas de la symétrie

- Certaines propriétés du cortex inféro-temporal sont avantageuses pour l'apprentissage de la lecture par l'enfant (par exemple l'invariance spatiale)
- D'autres pourraient être néfastes
- Le cortex inféro-temporal a évolué pour reconnaître les objets quelle que soit leur orientation.
- Cette invariance par symétrie doit être « désapprise »
- Ce désapprentissage peut expliquer les erreurs de lecture et d'écriture « en miroir » chez l'enfant, ainsi que leur persistance chez certains enfants dyslexiques

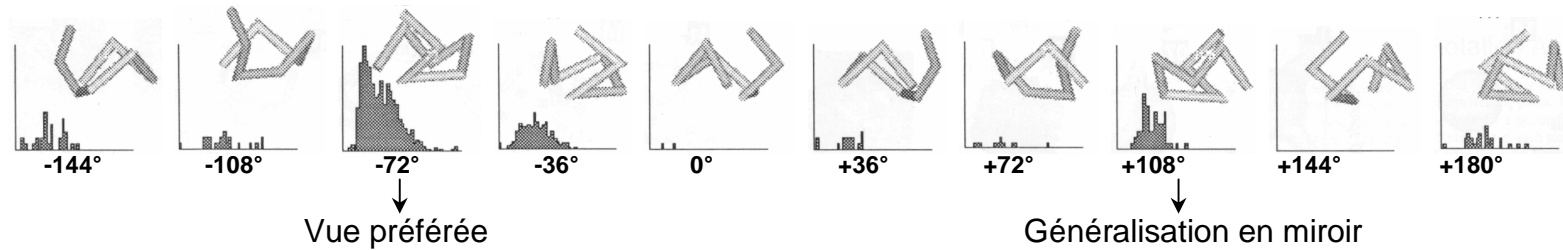


Les neurones du cortex inféro-temporal généralisent par symétrie en miroir

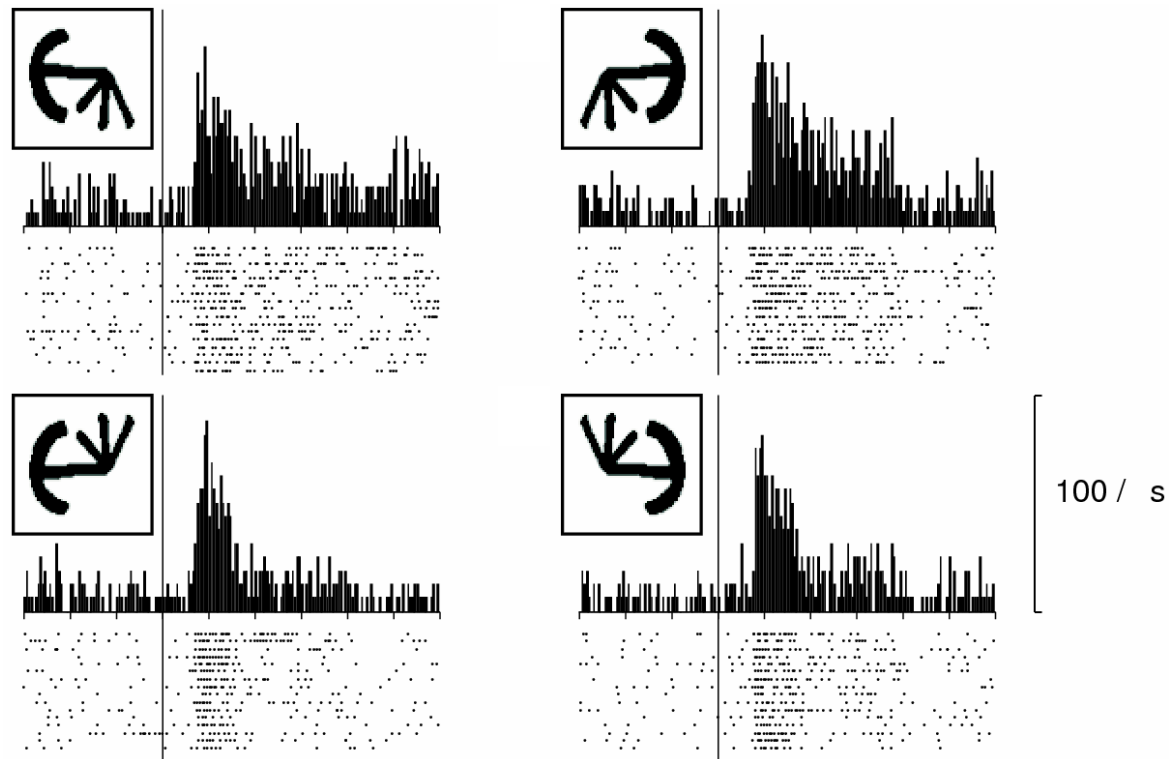
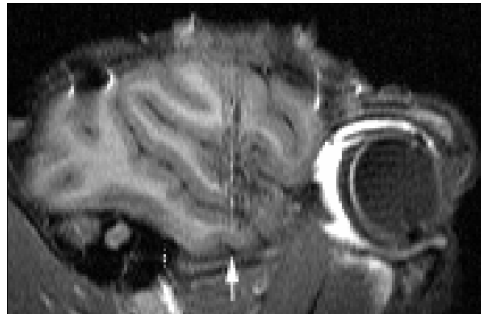
Performances de l'animal



Profil de réponse d'un neurone

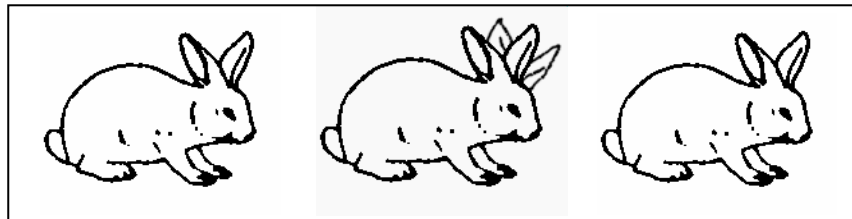
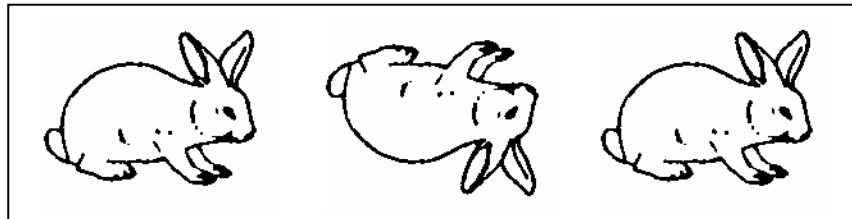
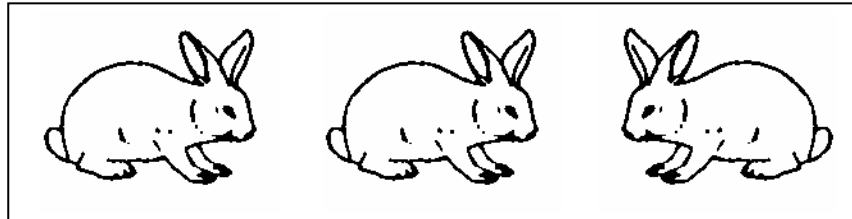


Les neurones du cortex inféro-temporal généralisent par symétrie en miroir



Agnosie pour l'orientation dans l'espèce humaine

Certains patients atteints de lésions pariétales ne détectent plus l'orientation gauche-droite des objets ce qui suggère que les régions occipito-temporales ventrales isolées généralisent en miroir



BLOUSE **BLOUSE** **BLOUSE**

BLOUSE **ESUOLB** **BLOUSE**



Un effet similaire existe chez le sujet normal:

- mauvaise mémoire de l'orientation des images
- effet d'amorçage à long terme en miroir (Biedermann & Cooper, 1991)

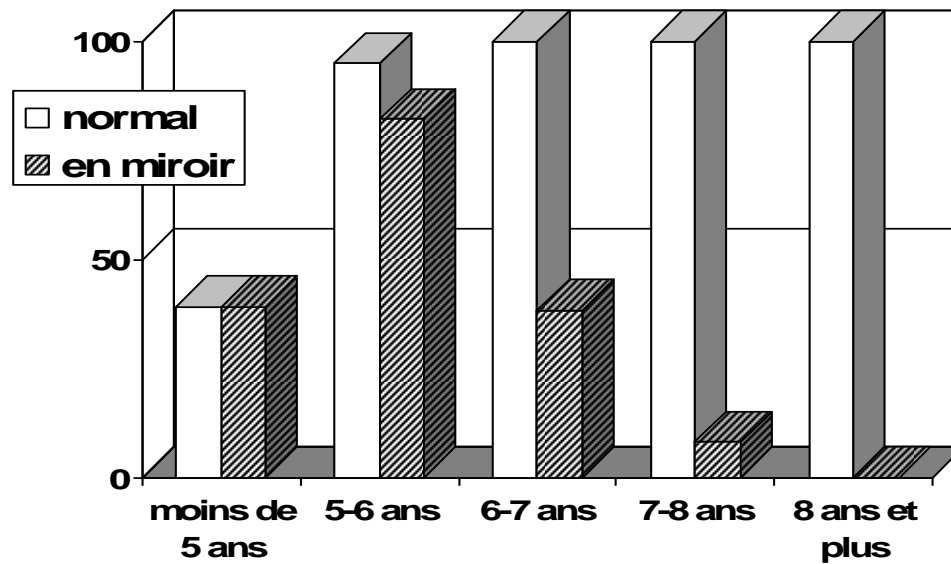
Les mots écrits semblent échapper à cette généralisation en miroir:
Chez le patient, pas d'erreurs en miroir pour les mots ou les lettres

Le « stade du miroir » au cours de l'apprentissage de la lecture et de l'écriture

•Lissie
 •meffie

ei 2 3 i j • meffie
 meffie • Lissie

9 i 2 2 i j •
 meffie •



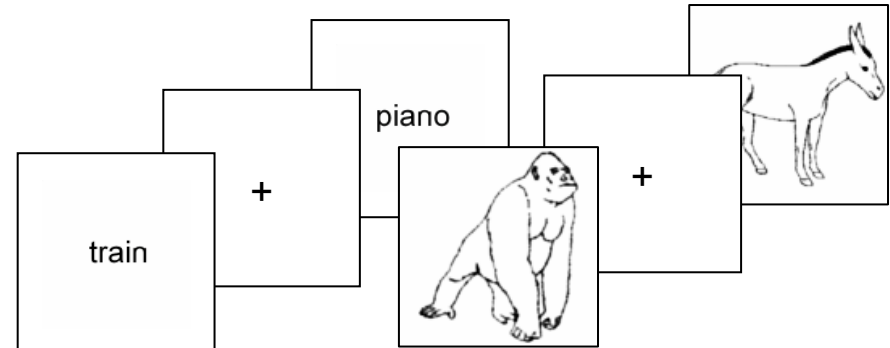
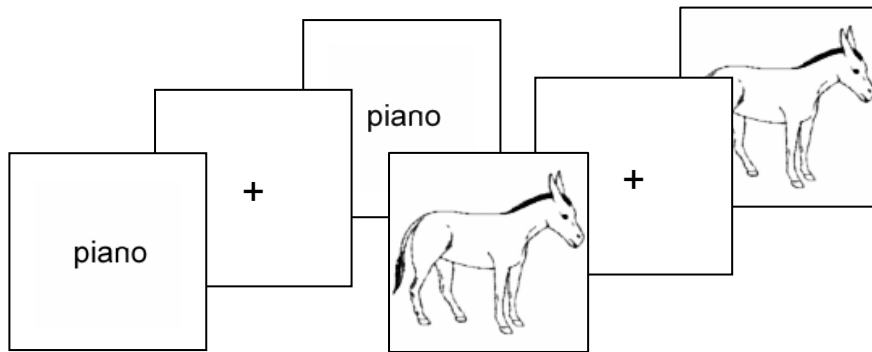
Amorçage en miroir pour les images et les mots

(Dehaene et al., en préparation)

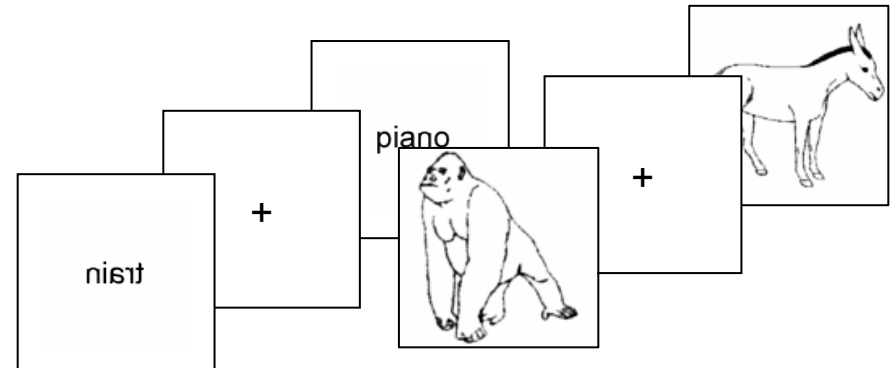
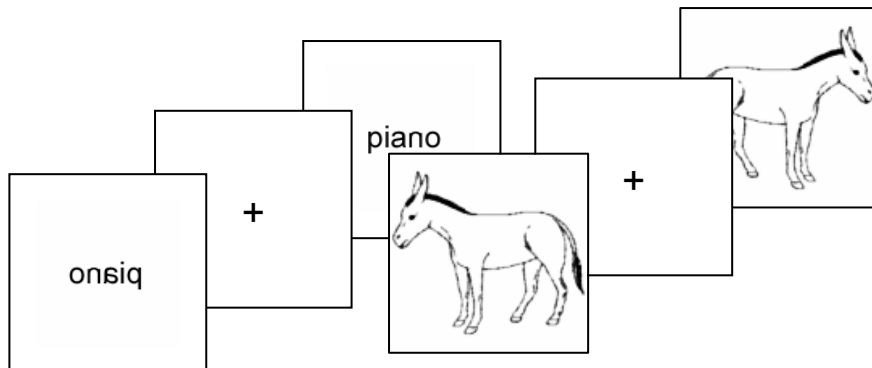
Répété

Different

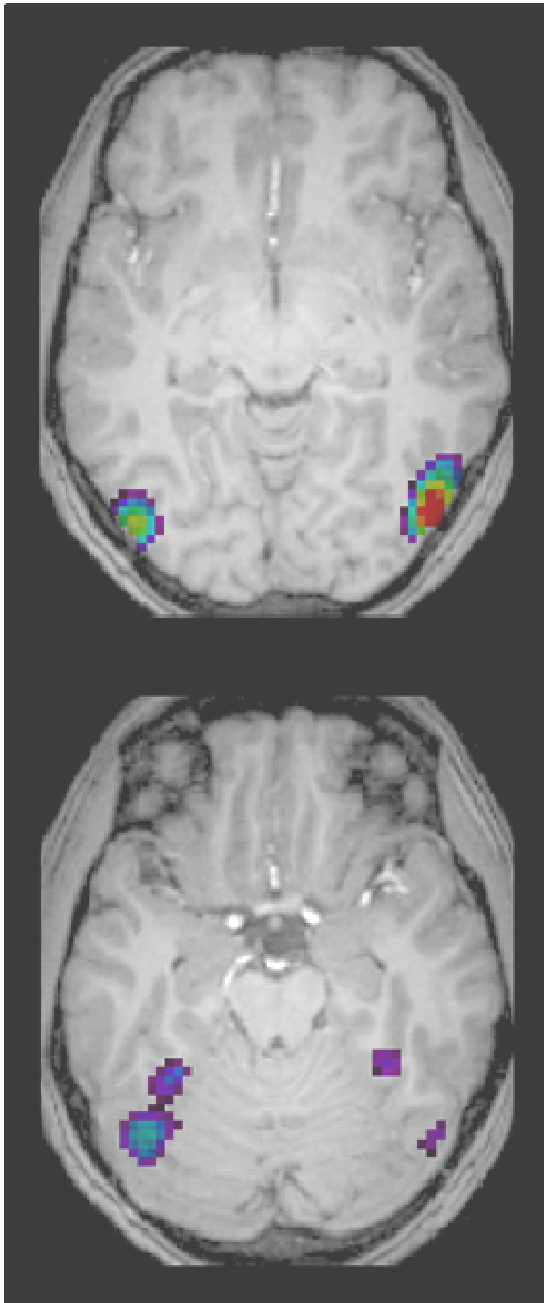
Amorces normales



Amorces en miroir



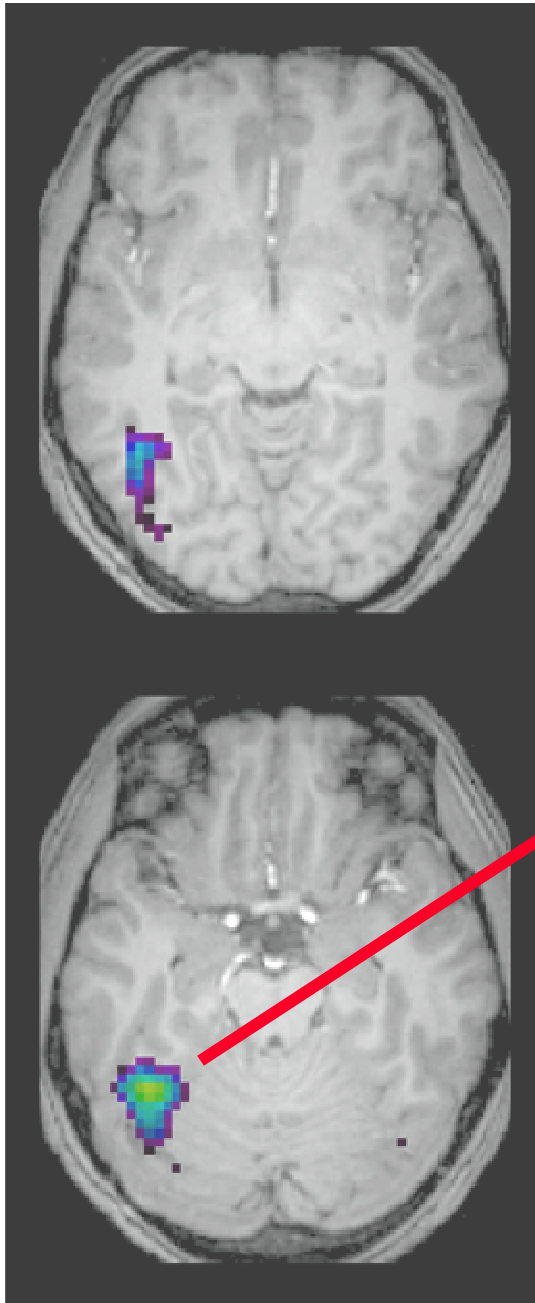
Effet de répétition pour les images



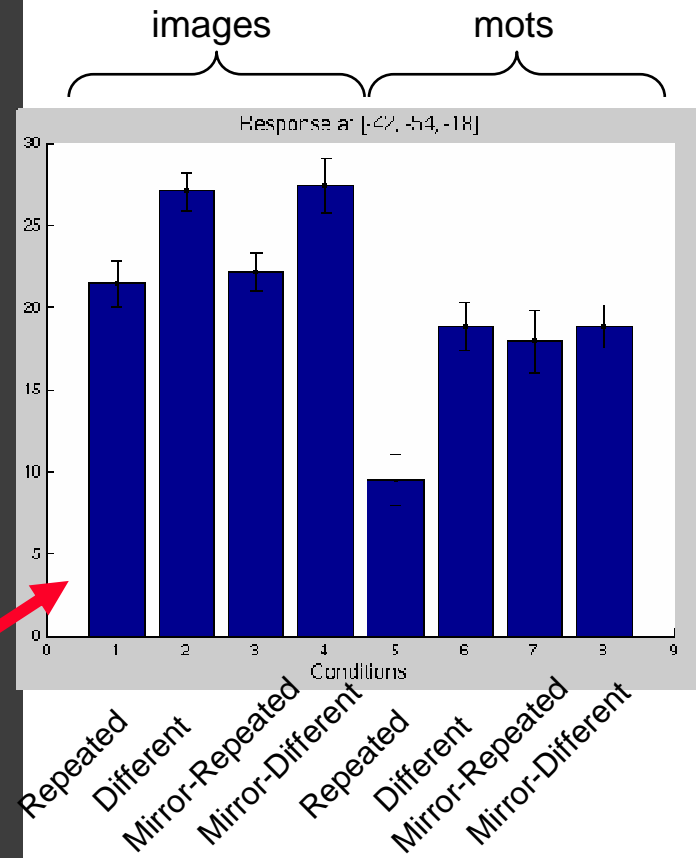
Z =
-6 mm

Z =
-18 mm

Effet de répétition pour les mots









Résultats préliminaires de 13 sujets français

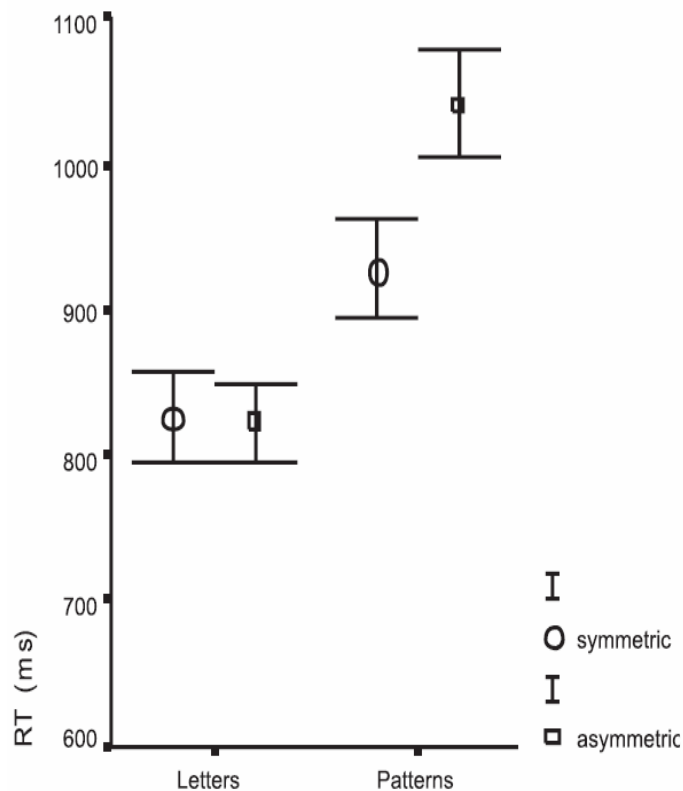


Chez les dyslexiques, le désapprentissage de la symétrie en miroir prendrait plus de temps

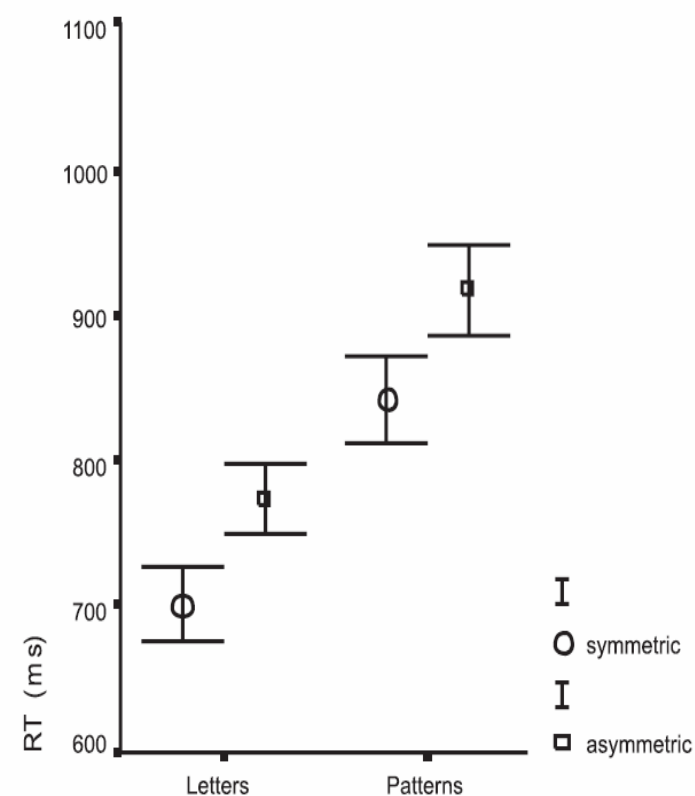
Lachmann, T., & van Leeuwen, C. (2007). Paradoxical enhancement of letter recognition in developmental dyslexia. *Dev Neuropsychol*, 31(1), 61-77.

- Tâche de jugement pareil/différent pour des paires de lettres ou de configurations de points
- Enfants dyslexiques vs. contrôles (n=24 vs 33, âge 9-10 ans)
- Les dyslexiques sont *plus rapides* que les contrôles et montrent un avantage lorsque les lettres sont symétriques

	ESS 4			ESS 8		
Patterns						
Letters	A	D	T	F	R	S



Normal Readers



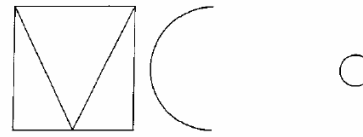
Dyslexics

Chez certaines personnes, la dyslexie semble causée par une anomalie de la perception de l'orientation et de l'organisation spatiale

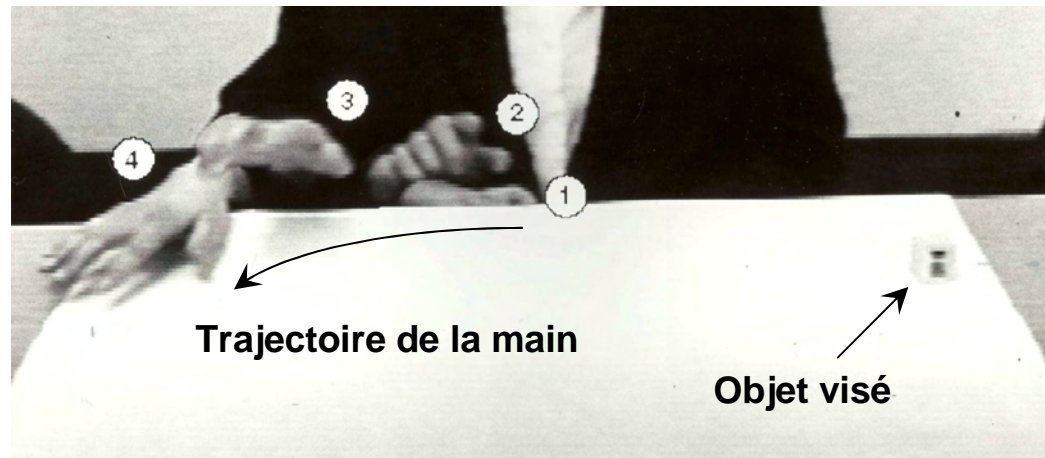
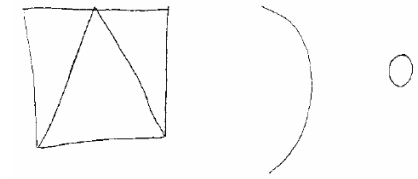
McCloskey et al. (1995, 2000)

Mot présenté	Réponse faite par A.H.
dog	bog
bone	done
pig	dig
star	tars
rib	rip
sun	nuns
skirt	skit
dust	dusk

Images à copier

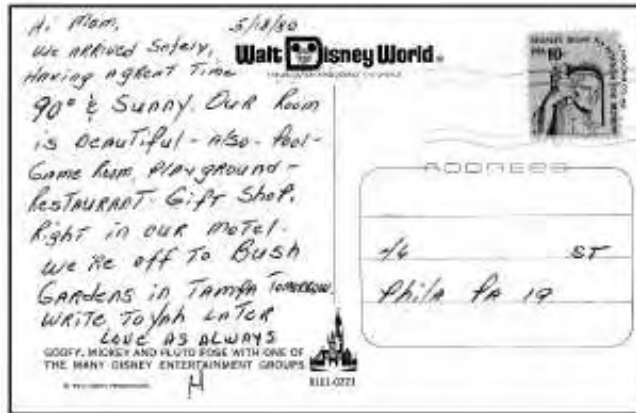


Copie par A.H.

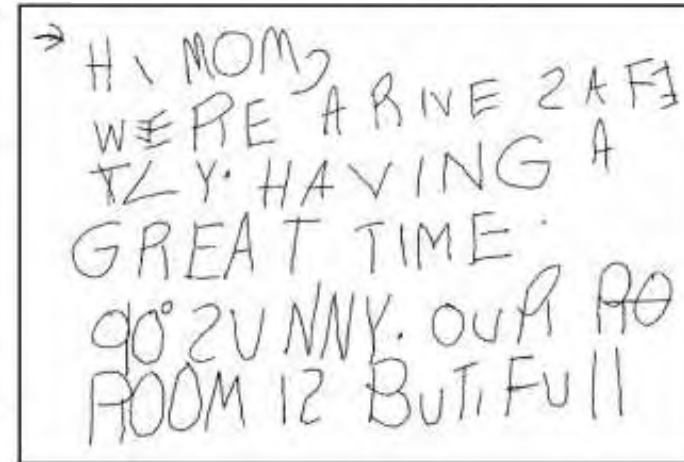


Une représentation symétrique « dormante » chez l'adulte?

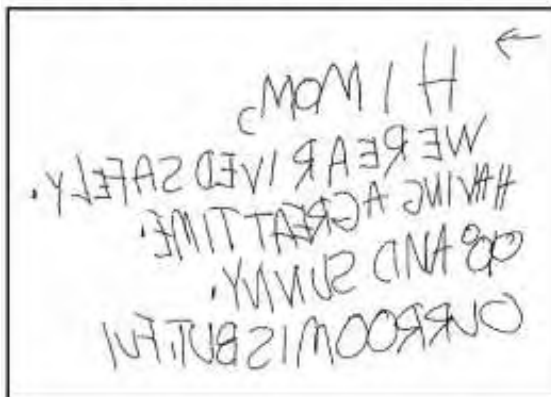
(A) Avant l'accident



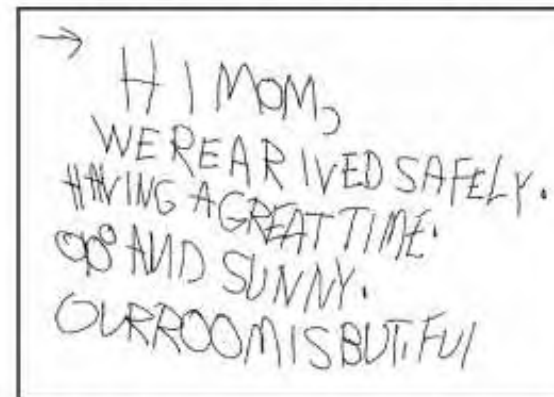
(B) Après l'accident, écriture en sens normal



(C) Après l'accident, écriture en miroir



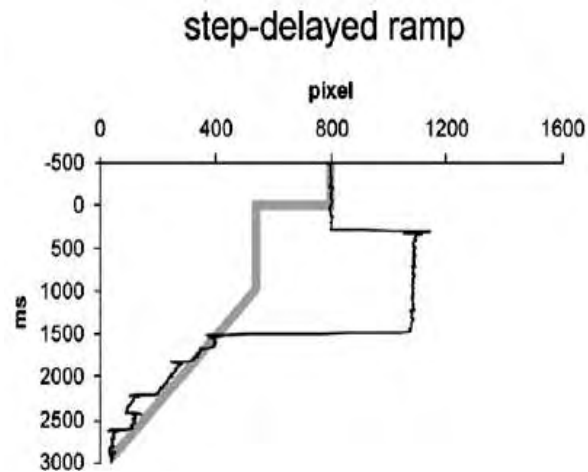
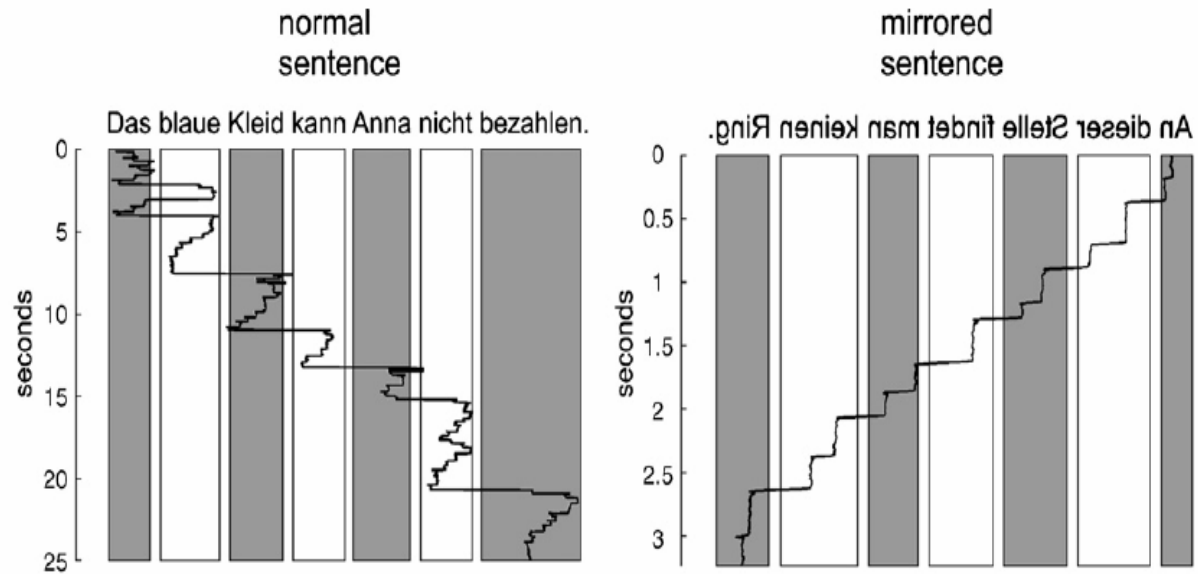
(D) Image miroir du texte C



Certains patients atteints de lésions cérébrales se mettent à écrire et à lire en miroir. On voit ici divers exemples d'écriture de la patiente H.N., avant et après son accident (d'après Gottfried et coll., 2003)

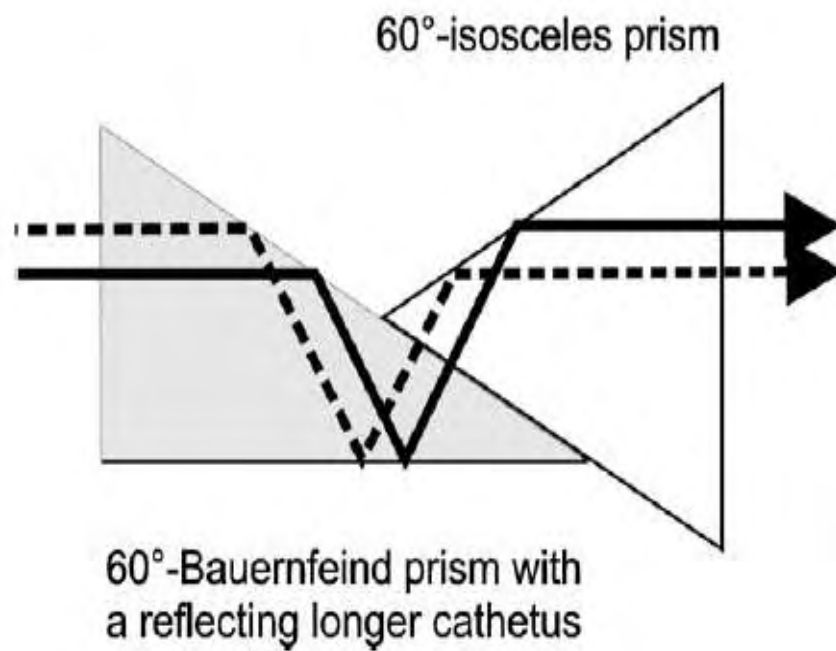
« Vision en miroir » chez un patient adulte

(Pflugshaupt et al., 2007)



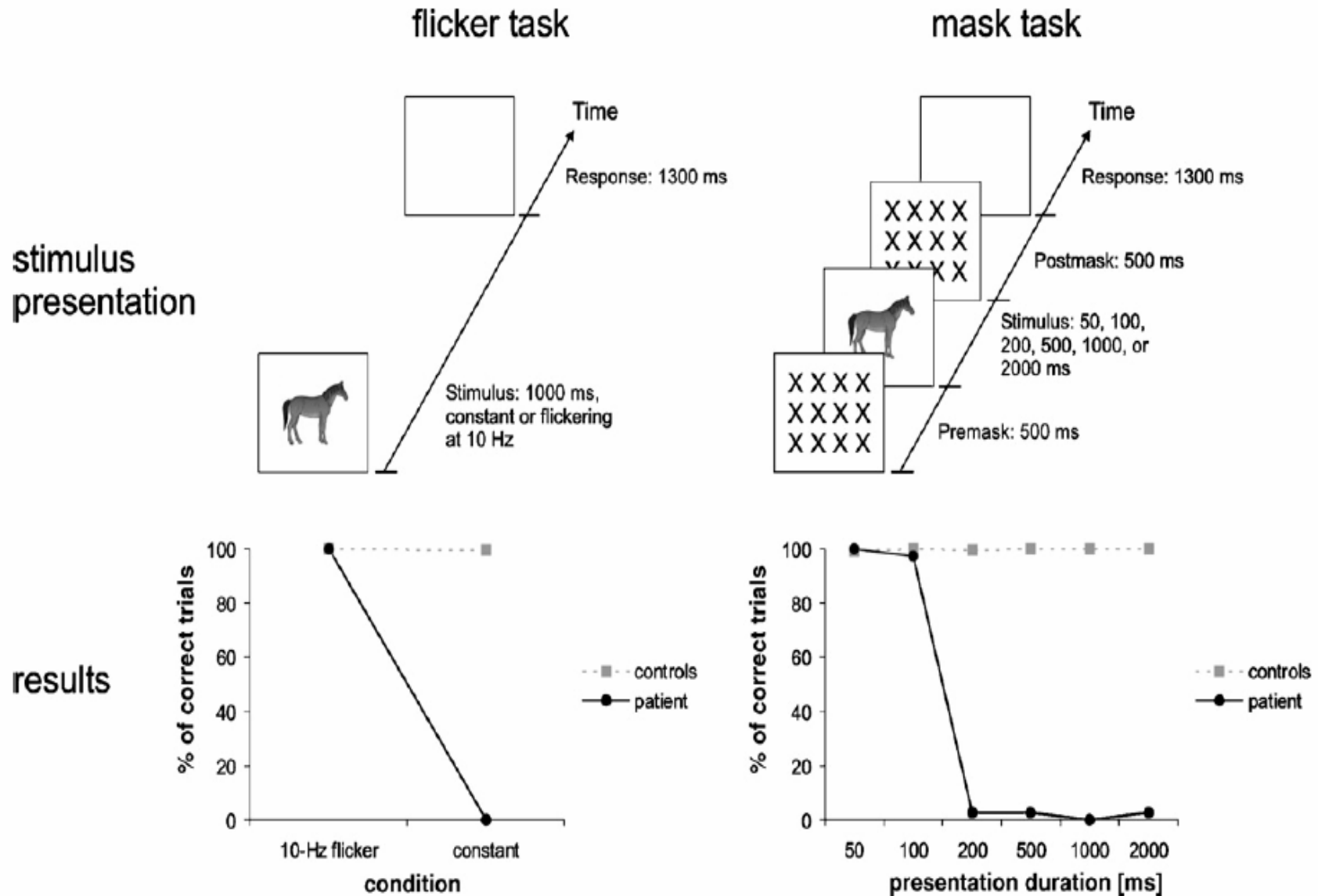
Saccades visuelles
rapides dans la
direction *opposée* au
stimulus!

Une aide à la lecture chez le patient de Pflugshaupt et al. (2007)!



Une autre observation mystérieuse: la perception s'améliore lorsque les stimuli sont présentés brièvement ou qu'ils clignent!

- seul un système lent ou « soutenu » (parvo-cellulaire) serait responsable de la symétrisation du monde visuel



Conclusions

- Le développement de la conscience phonologique joue un rôle fondamental dans l'acquisition de la lecture
- Une anomalie du traitement phonologique semble être fréquemment à l'origine des difficultés de lecture chez les enfants dyslexiques (ou, au minimum, être un excellent indice de l'importance de ces difficultés)
- Cependant, l'apprentissage de la reconnaissance visuelle invariante des lettres et des mots constitue également une étape essentielle dans l'acquisition d'une lecture fluente et experte
- Cet apprentissage visuel et le désapprentissage de la généralisation par symétrie pourraient constituer, chez certains enfants, la source primaire de la dyslexie.