

Mécanismes cérébraux de la lecture

Stanislas Dehaene

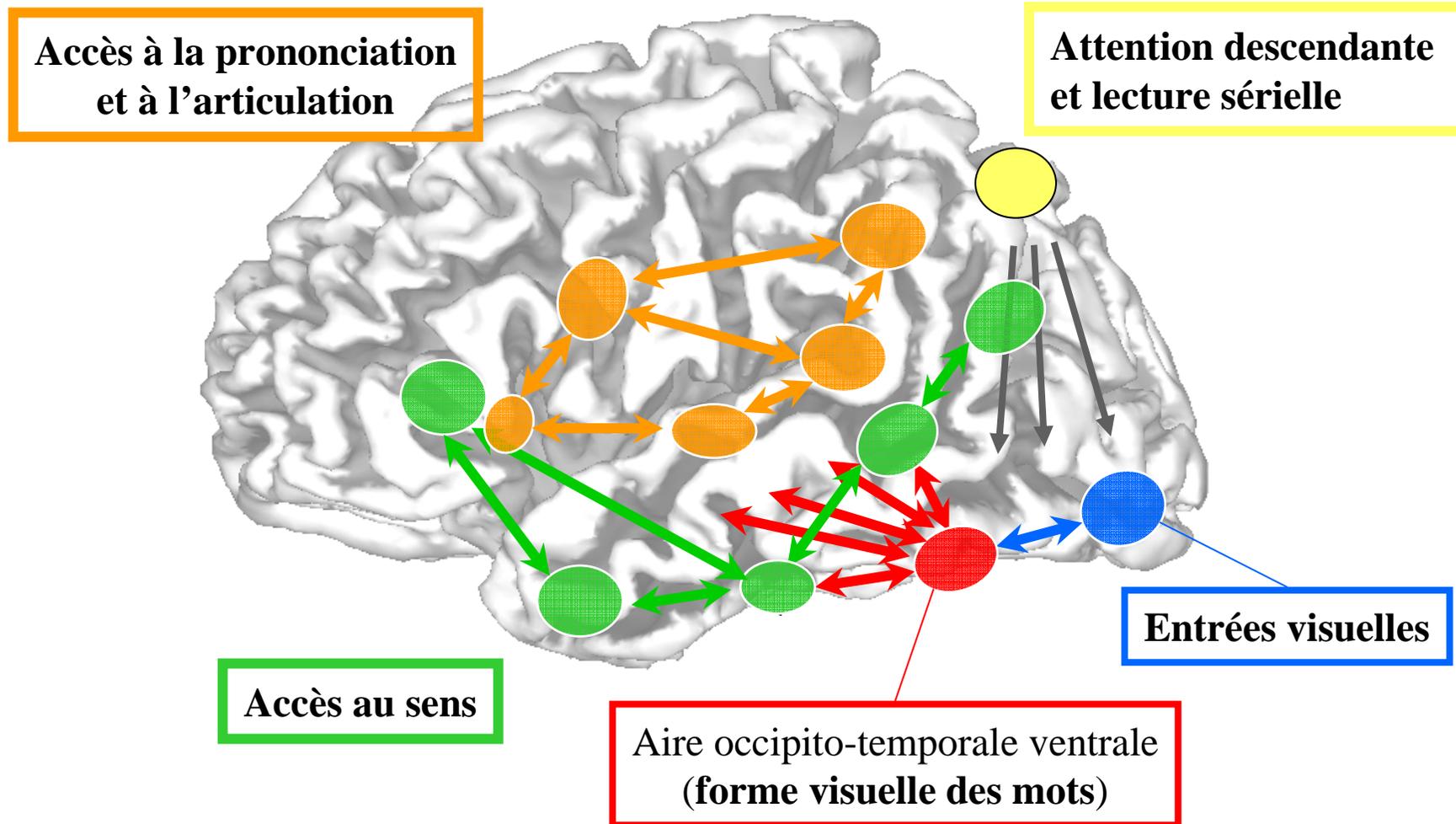
Chaire de Psychologie Cognitive Expérimentale

Cinquième Cours

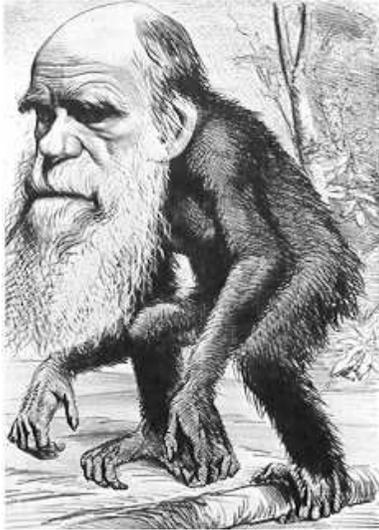
Variabilité culturelle et universalité des
mécanismes de la lecture

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:



Conséquences du modèle du recyclage neuronal pour la variabilité culturelle des systèmes d'écriture



- **Prédiction 1:**

L'architecture du cerveau humain n'a pas eu la possibilité d'évoluer pour la lecture – du moins au plan génétique.

Les systèmes d'écriture pourraient, inversement, avoir évolué afin de tenir compte des contraintes de notre cerveau.

Peut-on expliquer certains universaux trans-culturels de l'écriture par la nécessité d'un apprentissage facile par le cerveau du lecteur?

- **Prédiction 2:**

La difficulté d'apprentissage doit dépendre de la distance entre la fonction initiale d'une aire cérébrale et sa nouvelle fonction culturelle.

La difficulté d'apprentissage de la lecture dépend-elle de la complexité des règles qui doivent être apprises, et de leur adéquation à l'architecture de notre cerveau?

Traits universels des écritures

- Toutes requièrent l'acquisition séquentielle d'information sur les mots, par le biais de saccades oculaires.
- Toutes présentent, dans la fovéa de la rétine, une haute densité de traits hautement contrastés (typiquement noir sur blanc).
- Toutes reposent sur un petit répertoire de formes de base dont les combinaisons hiérarchiques forment les caractères
- Toutes considèrent que la position et la taille absolue des caractères sont indifférentes (présupposé d'invariance).

Une analyse strictement visuelle des écritures: les travaux de Changizi et Shimojo

- Changizi, M. A., & Shimojo, S. (2005). Character complexity and redundancy in writing systems over human history. *Proc Biol Sci*, 272(1560), 267-275.
- Changizi, M. A., Zhang, Q., Ye, H., & Shimojo, S. (2006). The Structures of Letters and Symbols throughout Human History Are Selected to Match Those Found in Objects in Natural Scenes. *Am Nat*, 167(5), E117-139.

Character complexity and redundancy in writing systems over human history

Mark A. Changizi^{1*} and Shinsuke Shimojo^{2,3}

- Examen de l'organisation des traits dans les caractères de plus de 100 systèmes d'écriture différents
- Découverte de deux régularités majeures:
 1. Quel que soit le nombre de caractères, le nombre de traits par caractère est approximativement constant (~3)
(ce qui signifie, bien entendu, que le répertoire de traits fondamentaux augmente avec le nombre de caractères)
- Ceci pourrait s'expliquer par la hiérarchie neuronale proposée dans le modèle LCD

A B C D E F G H I J K L M
N O P Q R S T U V W X Y Z



Λ Β C D E F G H I J K L M N
O P Q R S T U V W X Y Z



3, 3, 1, 2, 4, 3, 2, 3, 3, 2, 3, 2, 4,
3, 1, 2, 2, 3, 1, 2, 1, 2, 4, 2, 3, 3

Le modèle LCD (Local Combination Detectors)

Dehaene et al. *TICS*, 2005

Aire présumée

Unité codée

Structure du champ récepteur

Exemples de stimuli préférés

Sillon occipito-temporal gauche?
($y \approx -48$)

Petits mots et chaînes récurrentes de lettres (morphèmes)

TE EN
EN NT
TN ET

TENT sentent
CONTENT

Sillon occipito-temporal gauche?
($y \approx -56$)

Bigrammes locaux (« ouverts »)

EEN NN

EEN En

Aire V8 bilatérale?
($y \approx -64$)

Détecteurs de l'identité abstraite des lettres

E e

E e

Aire V4 bilatérale?

Forme des lettres (dans une casse donnée)

E E e

E E e

Aire V2 bilatérale

Contours locaux (fragments de lettres)

F F

F F

Aire V1 bilatérale

Barres orientées

+

+

Corps genouillé latéral

Contraste local

- + -

- + -

- + -



Character complexity and redundancy in writing systems over human history

Mark A. Changizi^{1*} and Shinsuke Shimojo^{2,3}

- Examen de l'organisation des traits dans les caractères de plus de 100 systèmes d'écriture différents
- Découverte de deux régularités majeures:
 1. Quel que soit le nombre de caractères, le nombre de traits par caractère est approximativement constant (~3)
(ce qui signifie, bien entendu, que le répertoire de traits fondamentaux augmente avec le nombre de caractères)
- Ceci pourrait s'expliquer par la hiérarchie neuronale proposée dans le modèle LCD
- On pourrait également transposer cette analyse à d'autres niveaux (traits élémentaires, morphèmes)
- 2. La redondance est d'environ 50% (on peut continuer à reconnaître un caractère même si environ la moitié de ses traits sont supprimés).

A B C D E F G H I J K L M
N O P Q R S T U V W X Y Z



A B C D E F G H I J K L M
N O P Q R S T U V W X Y Z



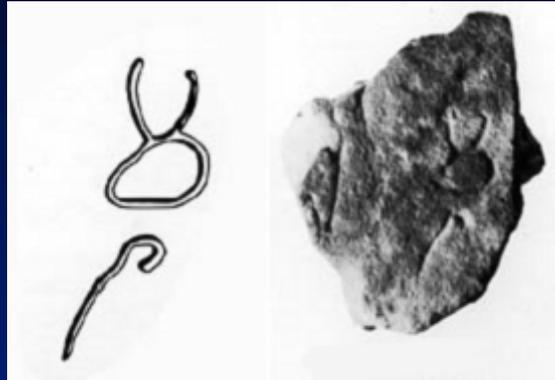
3, 3, 1, 2, 4, 3, 2, 3, 3, 2, 3, 2, 4,
3, 1, 2, 2, 3, 1, 2, 1, 2, 4, 2, 3, 3

Les formes de nos lettres ne sont-elles que de simples accidents de l'évolution culturelle?

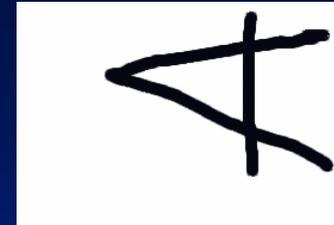
Lascaux



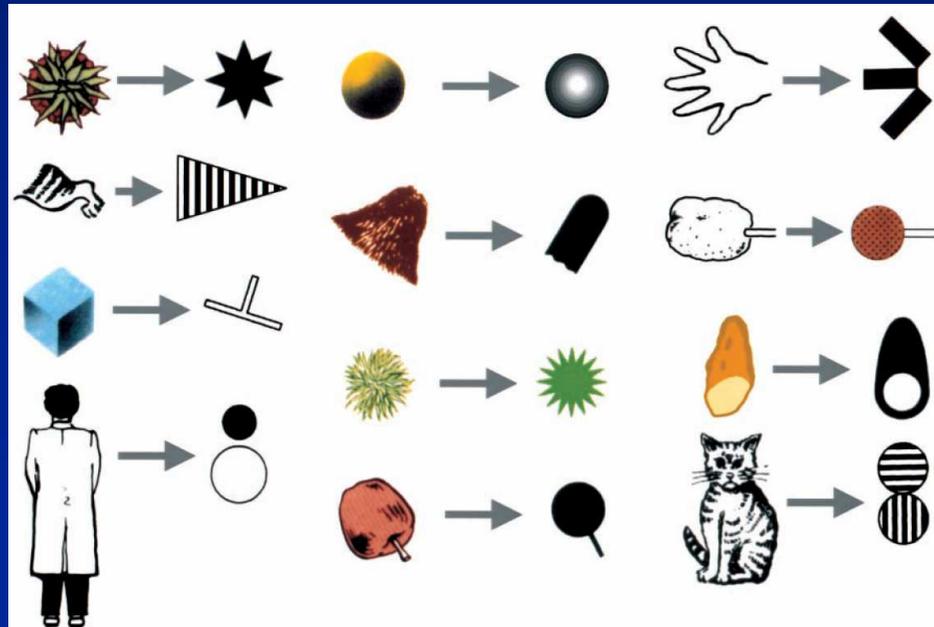
Proto-sinaïtique



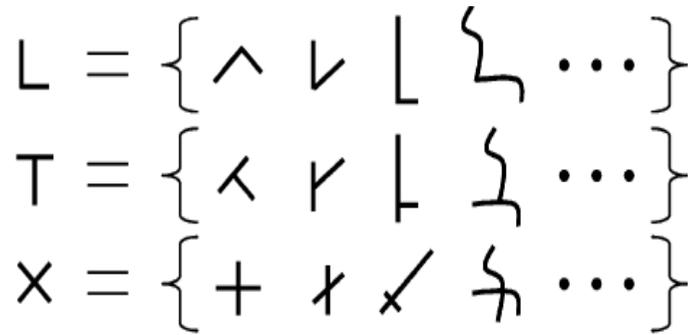
Phénicien



Grec / Latin

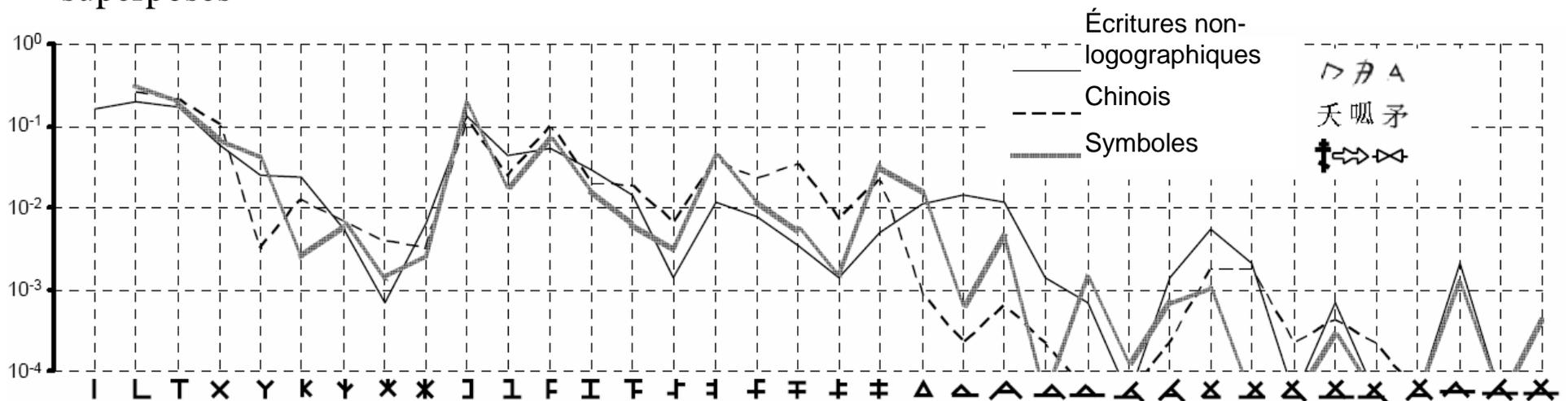


La distribution universelle de Changizi

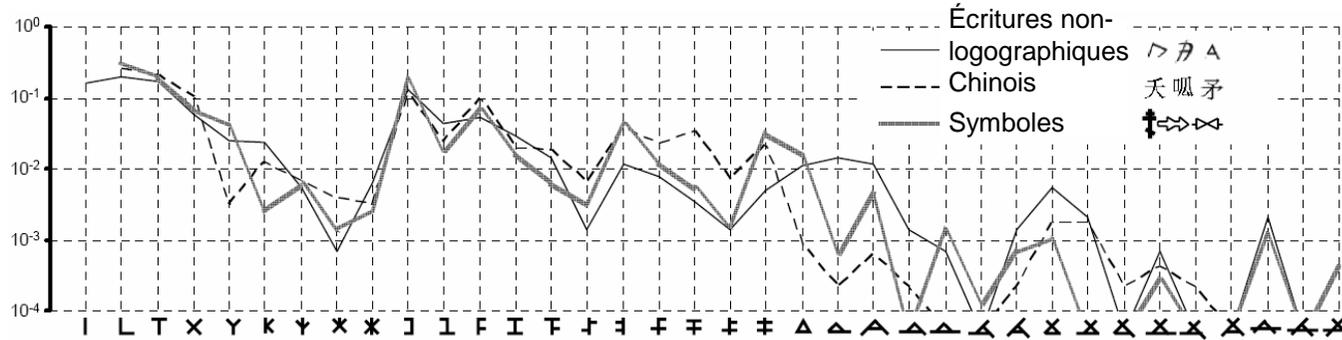


1 line	2 L	3 T	4 X
5 Y	6 K	7 Ψ	8 man
9 asterisk			
10 Z	11 1	12 F	13 H
14 TF	15 TL	16 Π	17 F-
18 T-	19 FL	20 ≠	
21 Δ	22 P	23 A	24 P'
25 tent	26 spiral	27 A'	28 drum
29 A-	30 drum'	31 table	32 chair
33 A''	34 not <	35 A'-	36 camp

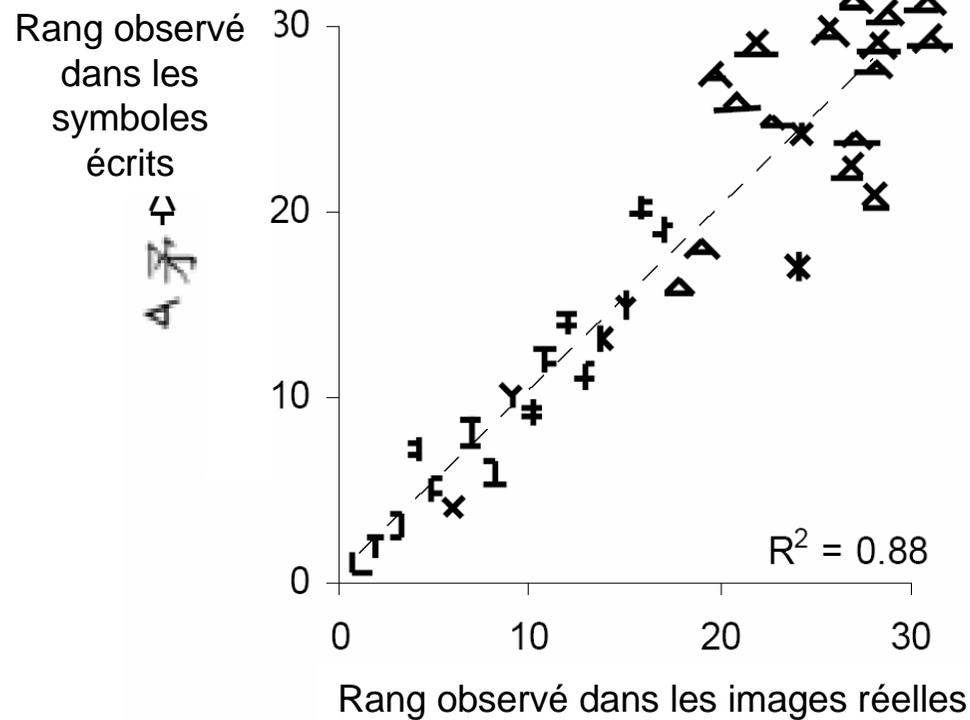
- Comptage des configurations topologiques de contours dans un grand nombre de systèmes d'écriture
- Découverte d'une loi statistique universelle
- Cette loi n'existe pas dans (1) les gribouillages (2) les distributions aléatoires de traits superposés



La distribution universelle de Changizi



Corrélation entre symboles écrits et fragments d'images



Conclusion:

Les configurations de contours les plus fréquentes dans le monde naturel pourraient

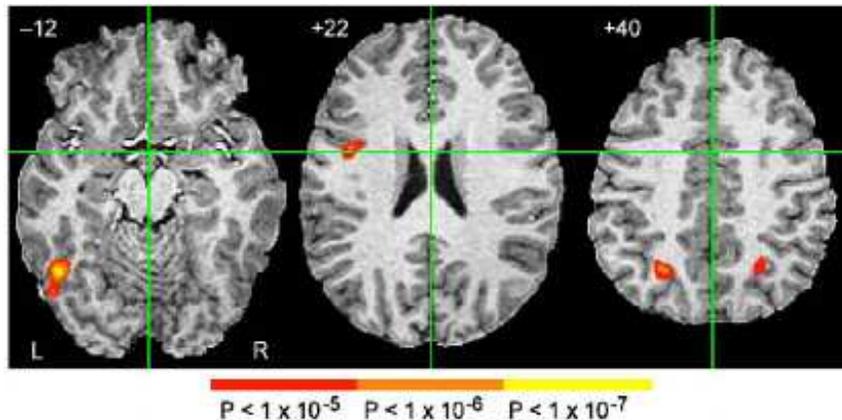
1. être mieux codées au niveau du cortex inféro-temporal impliqué dans la reconnaissance visuelle des objets
2. avoir ensuite été « co-optées » par les systèmes d'écriture au cours de leur évolution culturelle, car elles constituent les formes les plus aisément reconnaissables

Le cortex inféro-temporal ventral s'adapte aux régularités visuelles et orthographiques d'une écriture donnée

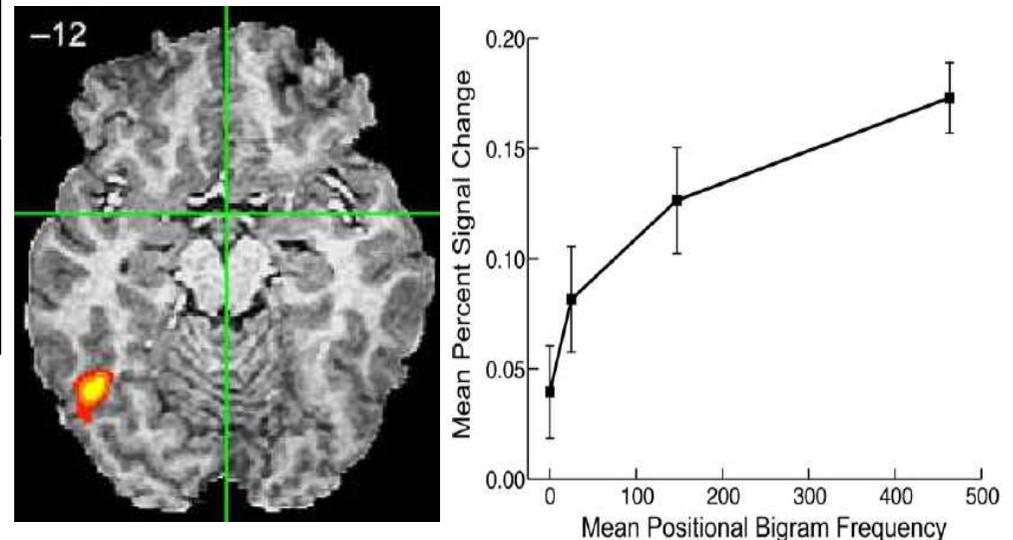
La région occipito-temporal ventrale gauche répond aux pseudo-mots en proportion directe de la fréquence de leurs bigrammes.

- Sélection de 4 catégories de chaînes de lettres en fonction de la fréquence de leurs bigrammes à une position donnée.
exemples: cvgzm axmnr vamws icnre
- Tâche = détection de lettres ascendantes (t, l...)

Réseau corrélé avec la familiarité orthographique



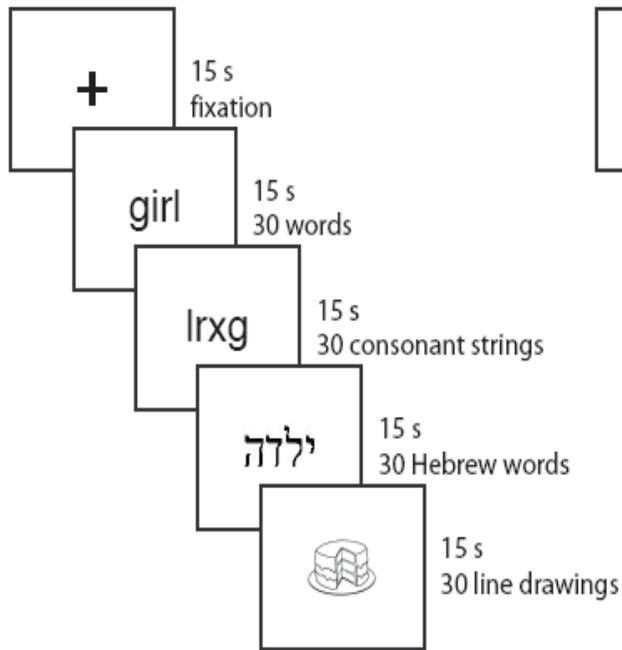
Après régression de l'effet du temps de réaction, ne reste que l'activation occipito-temporal ventrale gauche



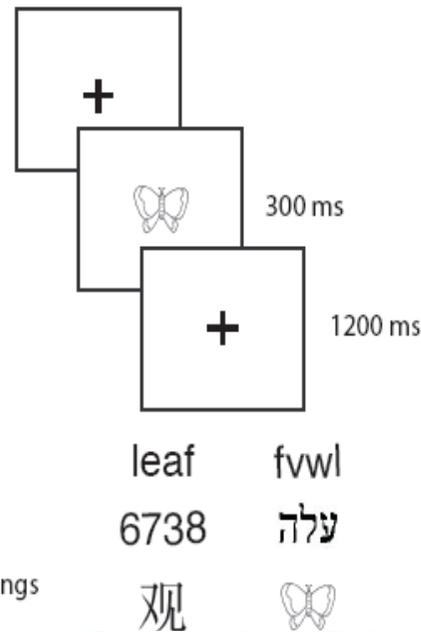
Le cortex inféro-temporal ventral s'adapte aux régularités visuelles et orthographiques d'une écriture donnée

Baker, C. I., Liu, J., Wald, L. L., Kwong, K. K., Benner, T., & Kanwisher, N. (2007). Visual word processing and experiential origins of functional selectivity in human extrastriate cortex. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 104(21), 9087-9092.

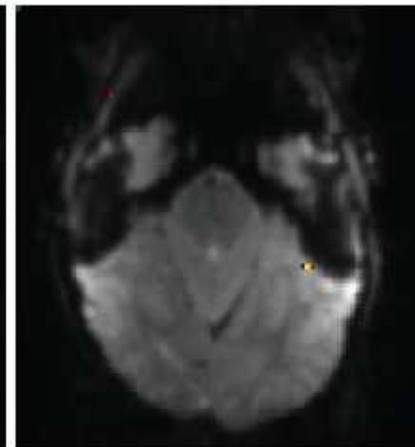
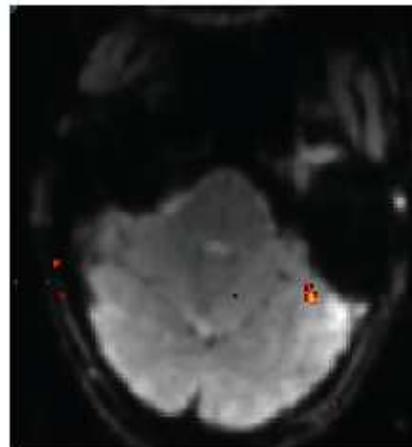
A Blocked design



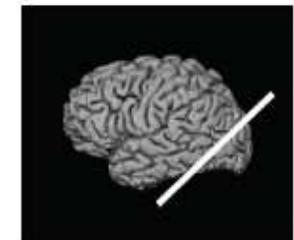
B Event-related design



- IRM fonctionnelle de lecteurs de l'anglais ou de l'anglais plus l'hébreu
- Présentation de plusieurs types de stimuli: mots anglais, chaînes de consonnes, mots hébreux, mots chinois, chiffres, dessins au trait
- tâches: examen passif, détection de répétition (« 1-back ») ou détection de mouvement
- IRM de haute résolution (1.5 x 1.5 x 2 mm) et régions individuelles



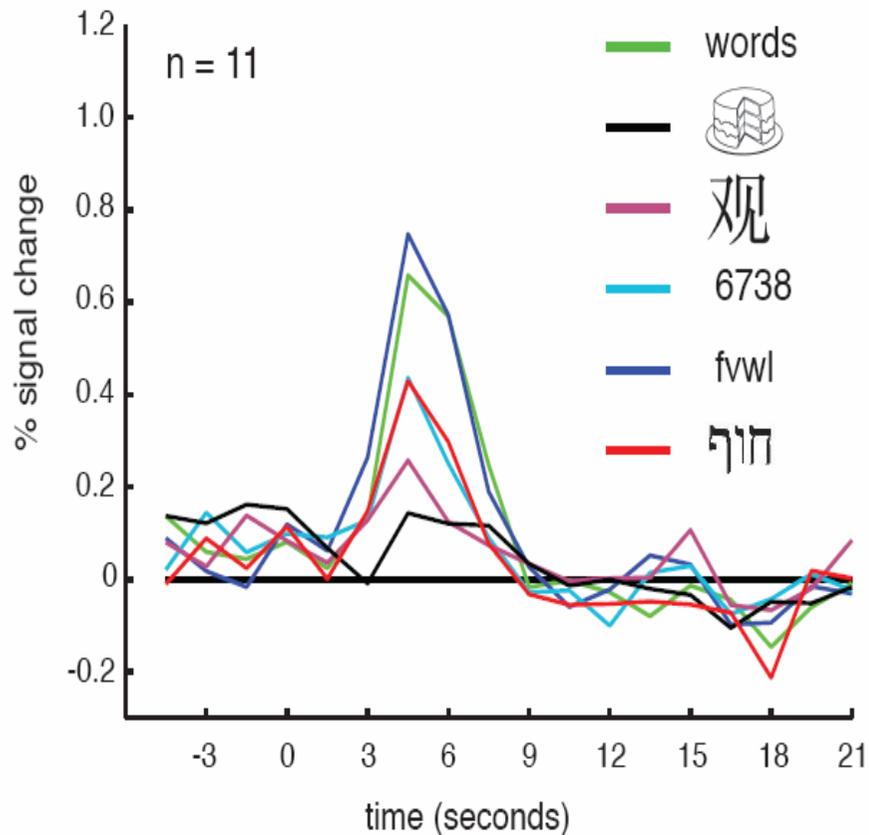
girl > cake



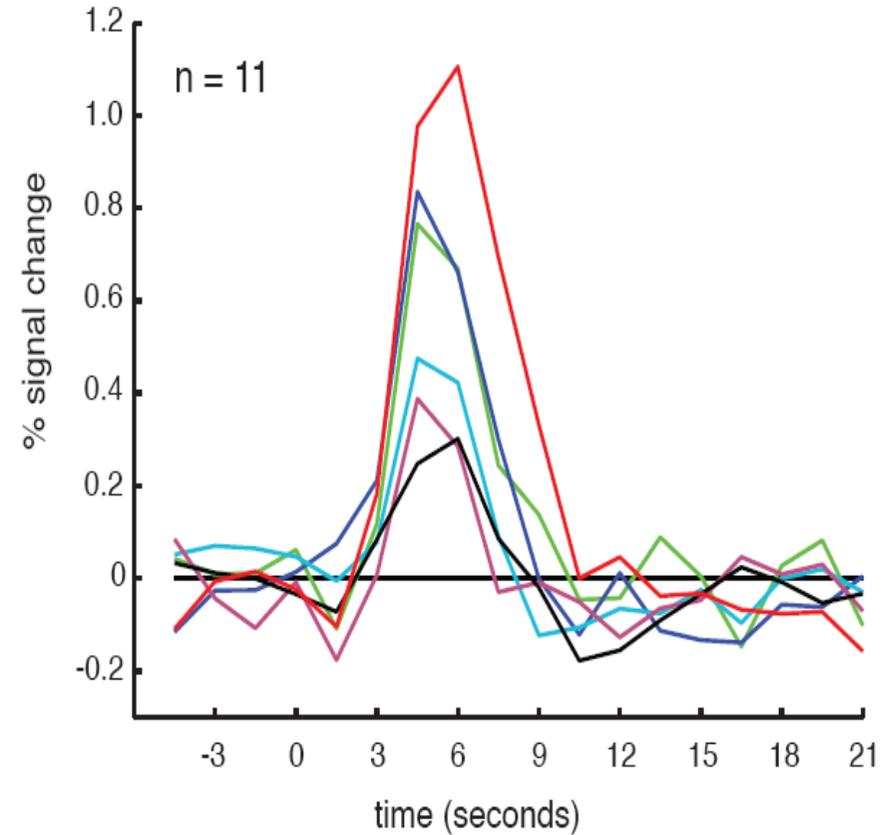
Le cortex inféro-temporal ventral s'adapte aux régularités visuelles et orthographiques d'une écriture donnée

Baker, C. I., Liu, J., Wald, L. L., Kwong, K. K., Benner, T., & Kanwisher, N. (2007). Visual word processing and experiential origins of functional selectivity in human extrastriate cortex. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 104(21), 9087-9092.

Lecteurs de l'anglais



Lecteurs de l'anglais et de l'hébreu



La région de la forme visuelle des mots en Japonais

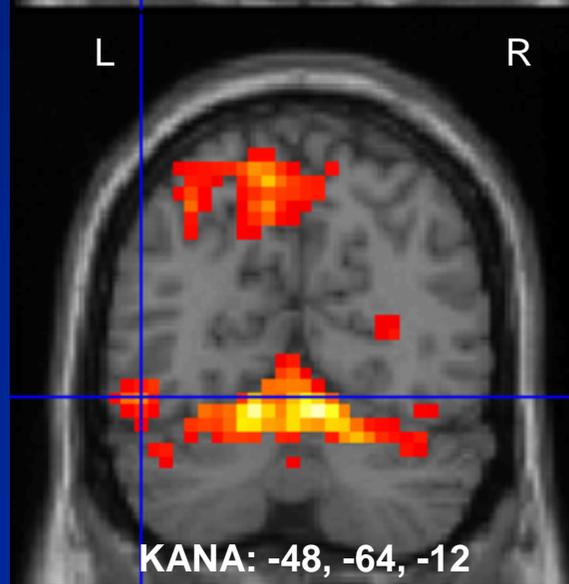
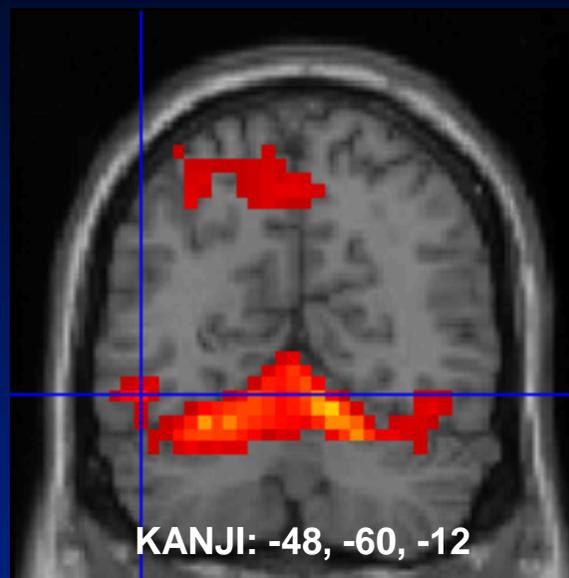
Activations par rapport au repos

Kanji

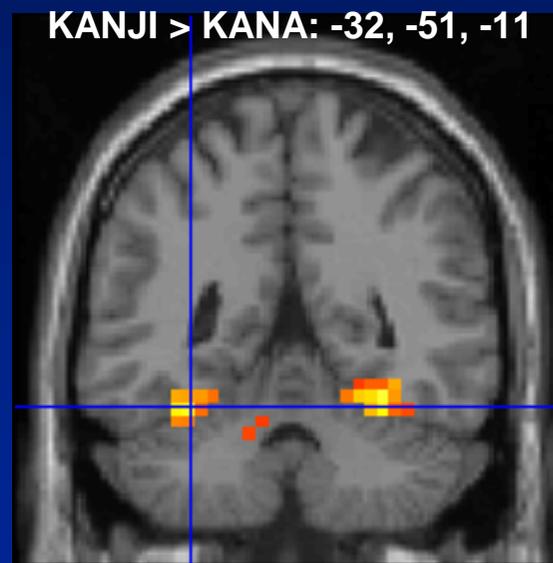
神	/kami/
神社	/jiN-ja/
神経	/shiN-kei/
精神	/sei-shiN/
神主	/kaN-nushi/
神戸	/kou-be/

Kana

か	/ka/
かみ	/ka-mi/
かさ	/ka-sa/
あか	/a-ka/
たから	/ta-ka-ra/

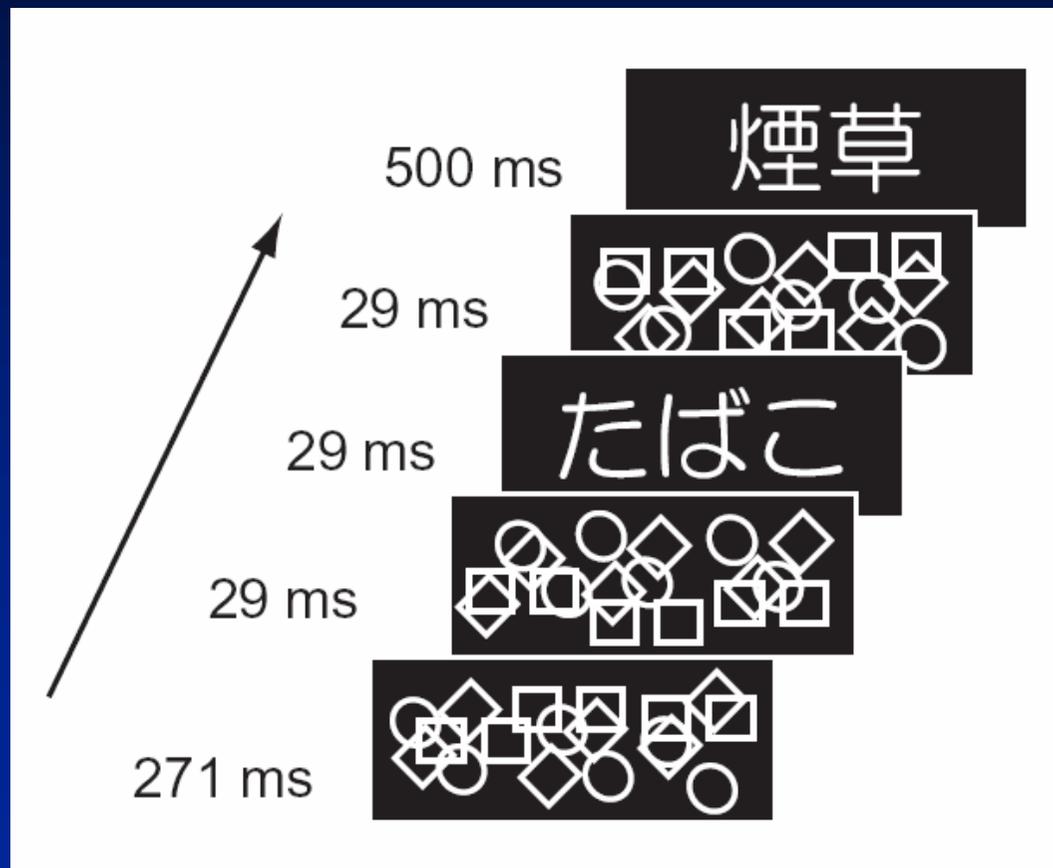


Déplacement vers la ligne médiane et activation supérieure à droite en Kanji



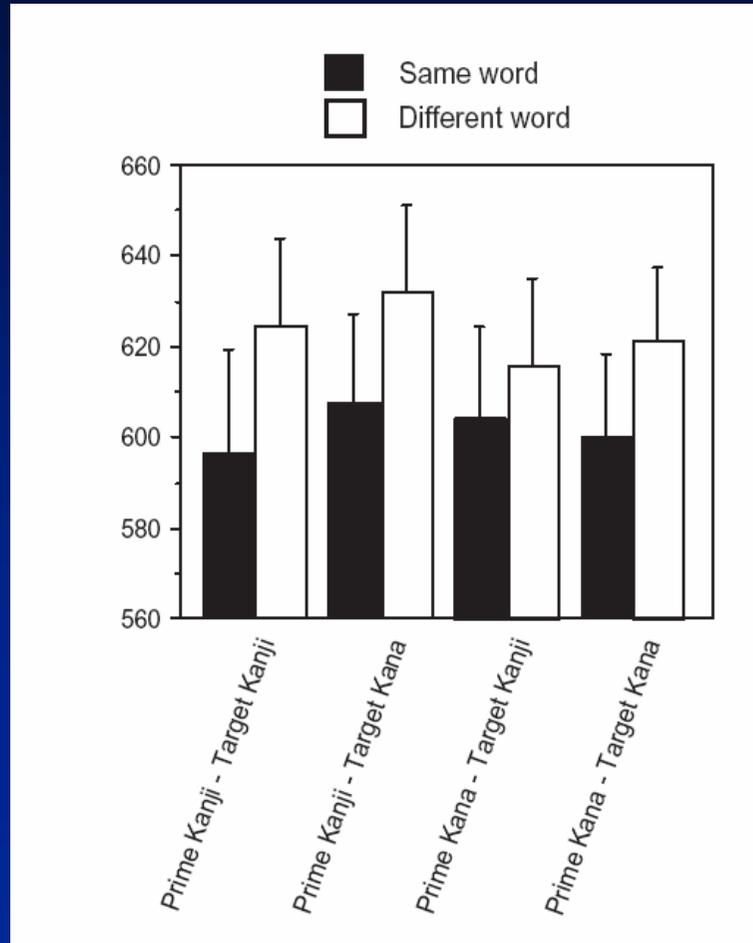
Amorçage entre Kanji et Kana chez les sujets japonais

- Amorces et cibles pouvaient apparaître en Kanji ou en Kana
- Tâche de classification sémantique (naturel/artificiel)



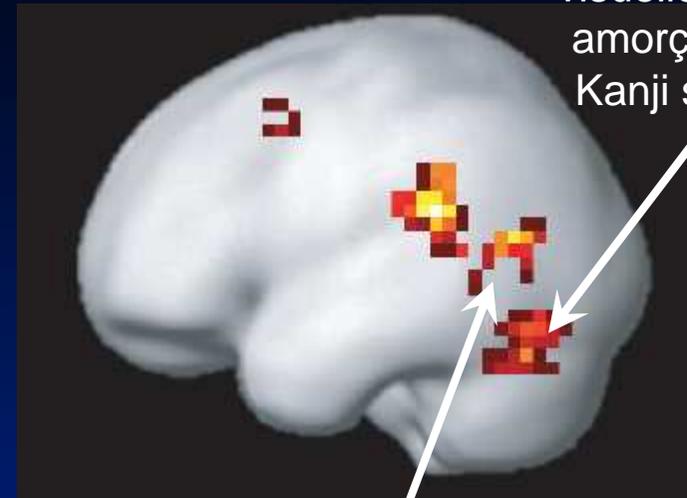
Amorçage en japonais

Comportement: Amorçage entre Kanji et Kana



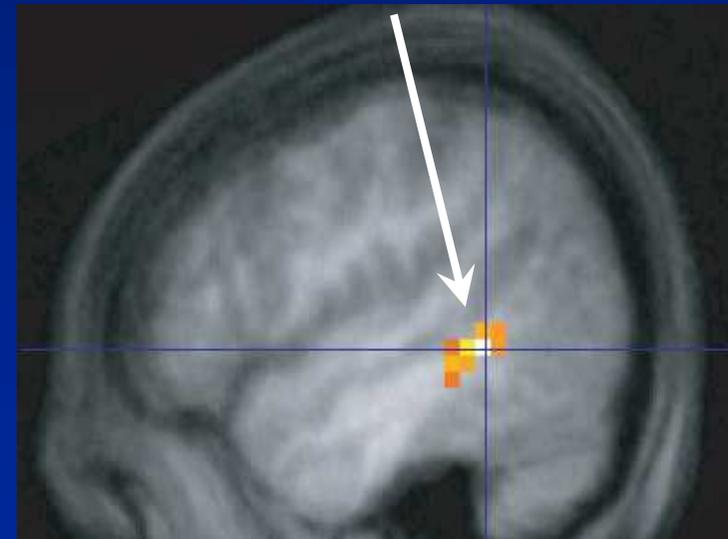
Nakamura, Dehaene et al., JOCN, 2005

Amorçage dans la condition Kanji-Kanji



Aire de la forme visuelle des mots: amorçage Kanji-Kanji seulement

Région temporale moyenne: Amorçage entre Kanji et Kana (codage lexico-sémantique?)



L'apprentissage de nouvelles correspondances graphèmes-phonèmes à l'âge adulte sollicite-t-il le même réseau cérébral?

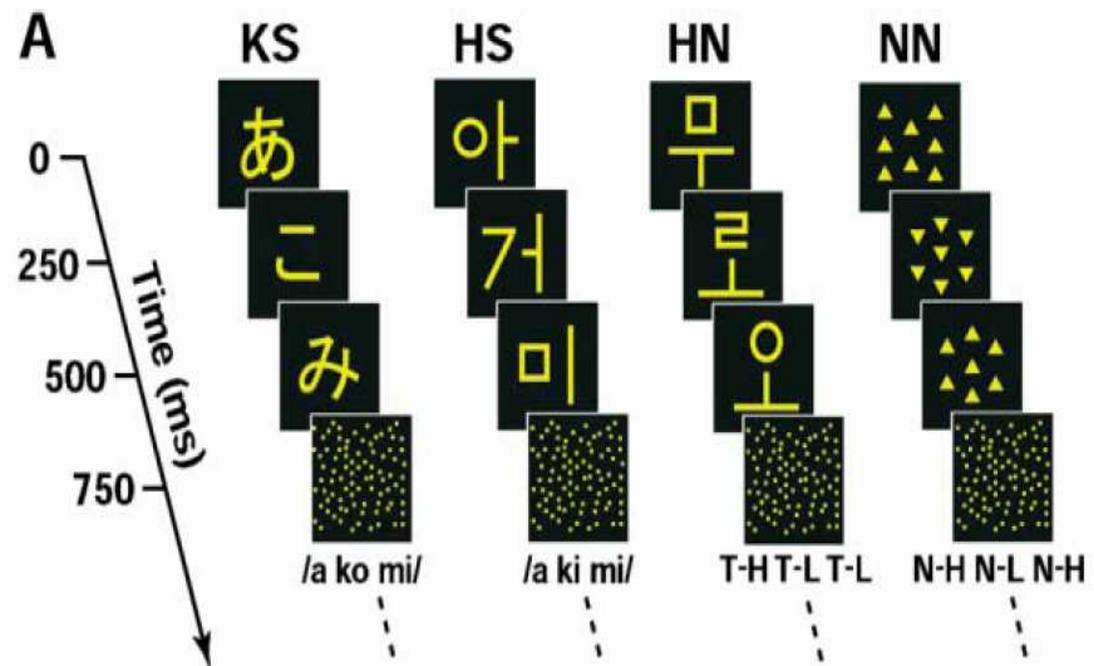
Sur deux jours d'entraînement, pendant l'imagerie par IRM fonctionnelle, 12 sujets japonais ont appris à lire des caractères en notation Hangul (Coréenne), nouvelle pour eux.

-Tâche de lecture (KS pour Kana-Speech): lire trois caractères en notation Kana et comparer avec un pseudo-mot tri-syllabique correspondant

-Tâche d'apprentissage (HS pour Hangul-Speech): comparer trois caractères Hangul avec un pseudo-mot tri-syllabique correspondant

-Tâches de contrôle: associer d'autres caractères Hangul (HN) ou des formes géométriques (NN) à des sons non-linguistiques

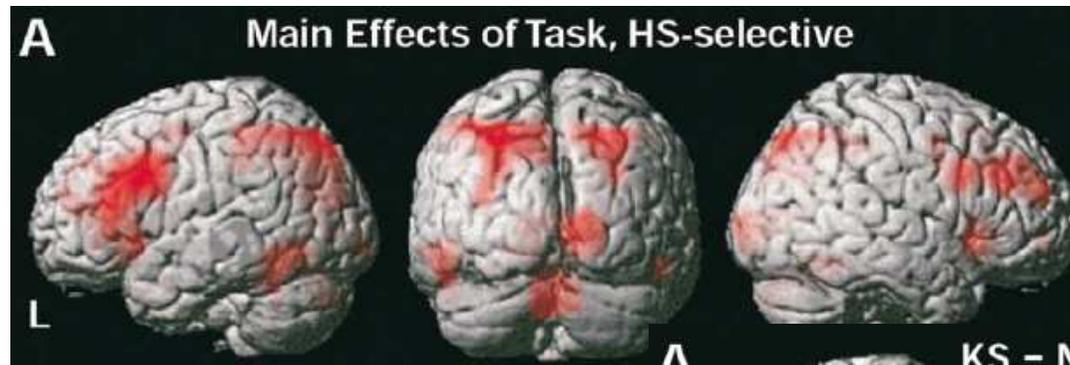
Hashimoto, R., & Sakai, K. L. (2004). Learning letters in adulthood: direct visualization of cortical plasticity for forming a new link between orthography and phonology. *Neuron*, 42(2), 311-322.



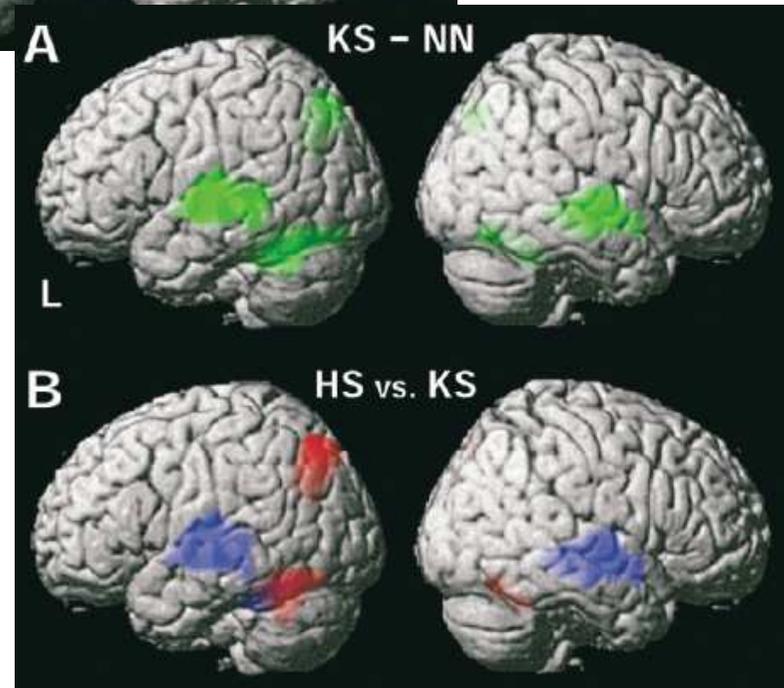
Apprentissage de correspondances graphèmes-phonèmes à l'âge adulte

Principaux résultats:

- L'apprentissage du Hangul recrute un réseau comprenant la région occipito-temporale ventrale gauche, le gyrus angulaire, et le cortex préfrontal latéral et inférieur



- Une partie de ces régions (en rouge) se recouvrent avec celles activées lors de la lecture des caractères Japonais Kana
- mais la région temporale supérieure (en bleu) est plus activée par les caractères connus (Kana) que par les caractères nouveaux (Hangul)

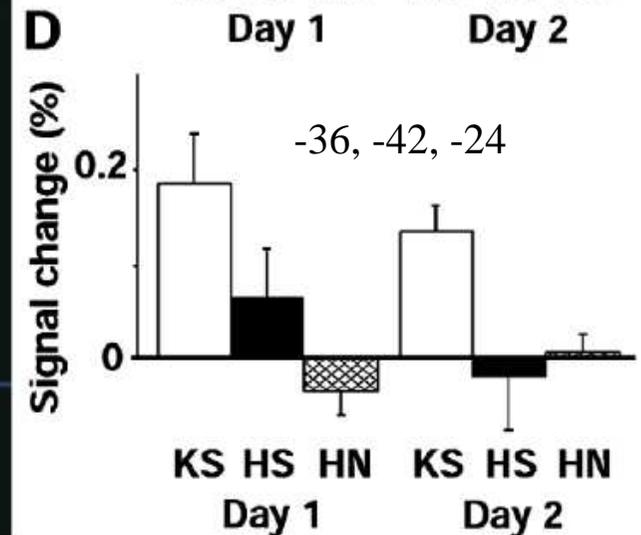
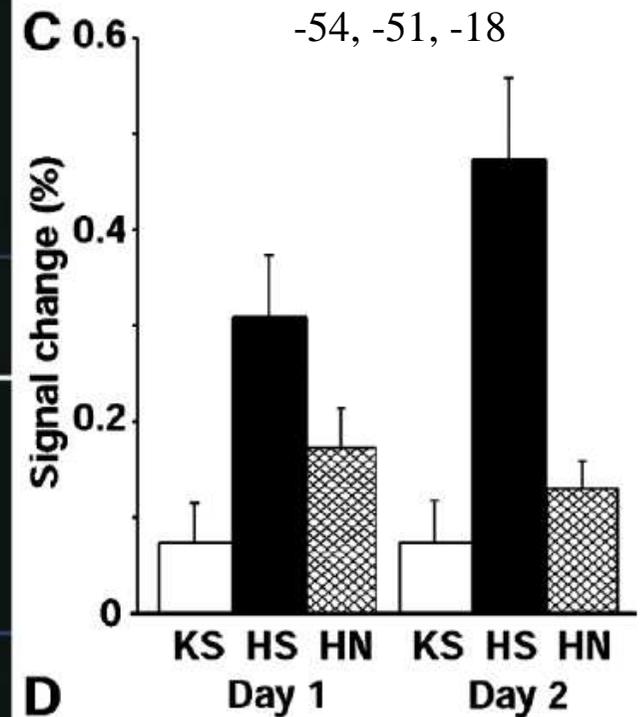
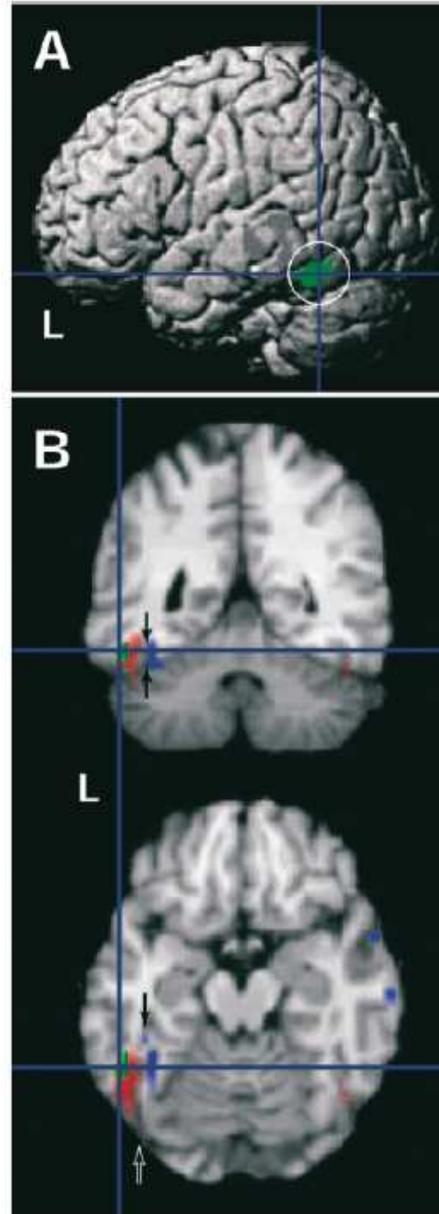
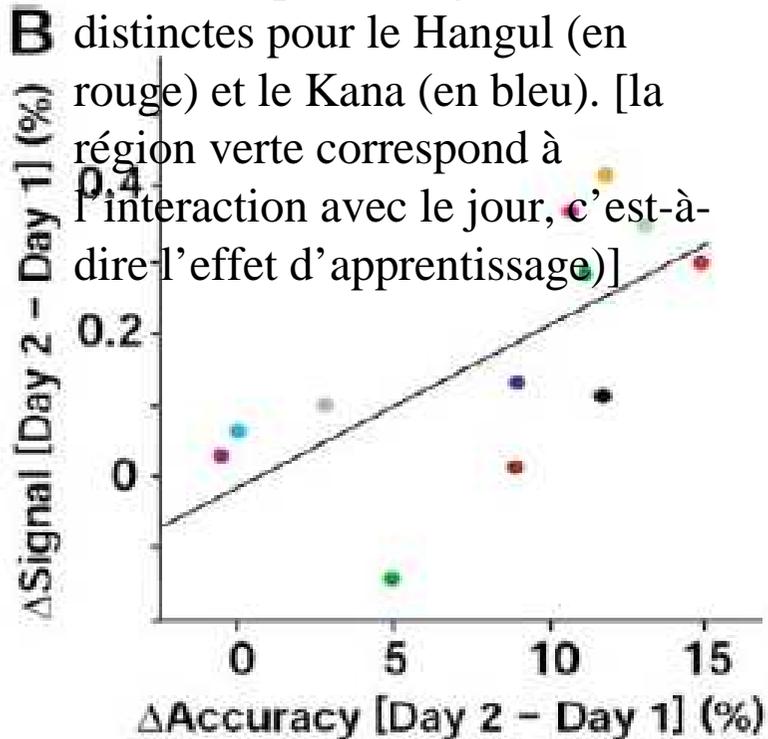


Hashimoto, R., & Sakai, K. L. (2004). Learning letters in adulthood: direct visualization of cortical plasticity for forming a new link between orthography and phonology. *Neuron*, 42(2), 311-322.

Apprentissage de correspondances graphèmes-phonèmes à l'âge adulte

-L'activité de la région occipito-temporale ventrale gauche augmente avec l'apprentissage
 -Cette augmentation corrèle avec l'amélioration des performances des sujets

- De façon plus surprenante, il existe des petites régions distinctes pour le Hangul (en rouge) et le Kana (en bleu). [la région verte correspond à l'interaction avec le jour, c'est-à-dire l'effet d'apprentissage]



Apprentissage de correspondances graphèmes-phonèmes à l'âge adulte

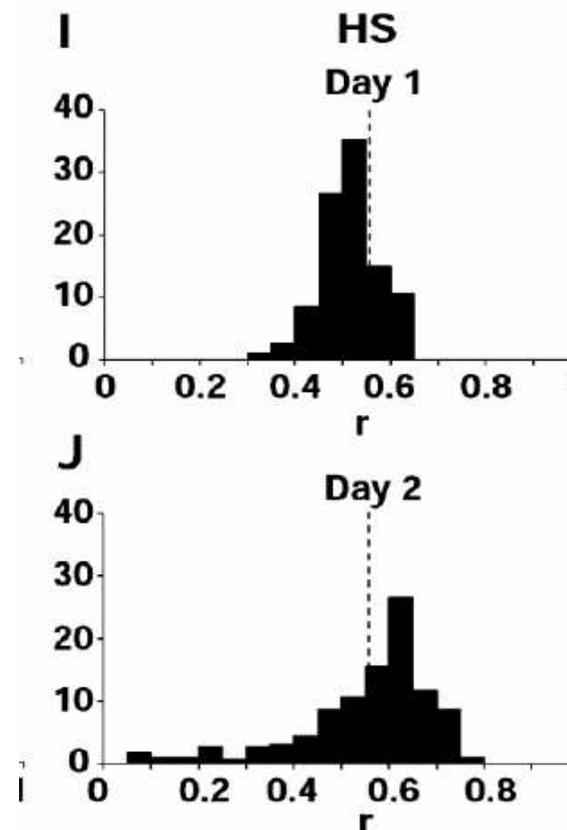
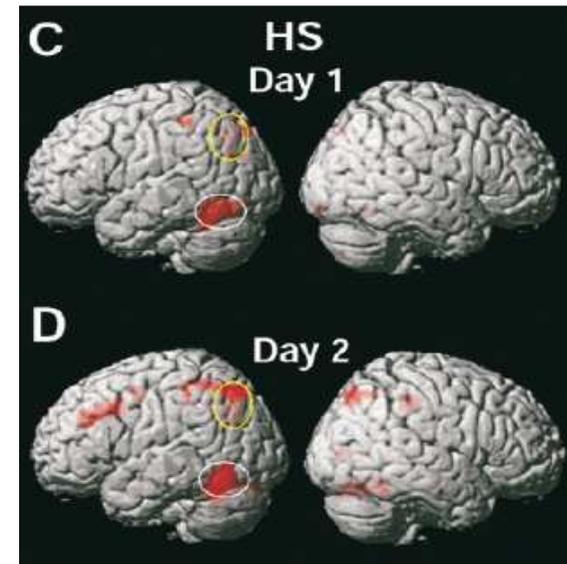
-Au cours de l'apprentissage, la corrélation fonctionnelle augmente entre la région occipito-temporale ventrale gauche et le gyrus angulaire

-Conclusions:

-Une voie de transcodage graphème-phonème se met en place au cours de l'apprentissage

-Que ce soit en écriture alphabétique, en Japonais ou en Hangul, celle-ci fait intervenir les mêmes voies anatomo-fonctionnelles, à de toutes petites différences près.

Hashimoto, R., & Sakai, K. L. (2004). Learning letters in adulthood: direct visualization of cortical plasticity for forming a new link between orthography and phonology. *Neuron*, 42(2), 311-322.



Universalité des écritures, mais aussi variabilité dans la relation entre l'écrit et le langage parlé

- Toutes requièrent l'acquisition séquentielle d'information sur les mots, par le biais de saccades oculaires.
- Toutes présentent, dans la fovéa de la rétine, une haute densité de traits hautement contrastés (typiquement noir sur blanc).
- Toutes reposent sur un petit répertoire de formes de base donc les combinaisons hiérarchiques forment les caractères
- Toutes considèrent comme évident que la position et la taille absolue des caractères est indifférente (présupposé d'invariance).

• **Toutes les écritures dénotent simultanément, quoique dans des proportions variables:**

-les sons de parole (mais avec des unités variables: traits phonétiques, phonèmes ou syllabes)

-les unités sémantiques (morphèmes)

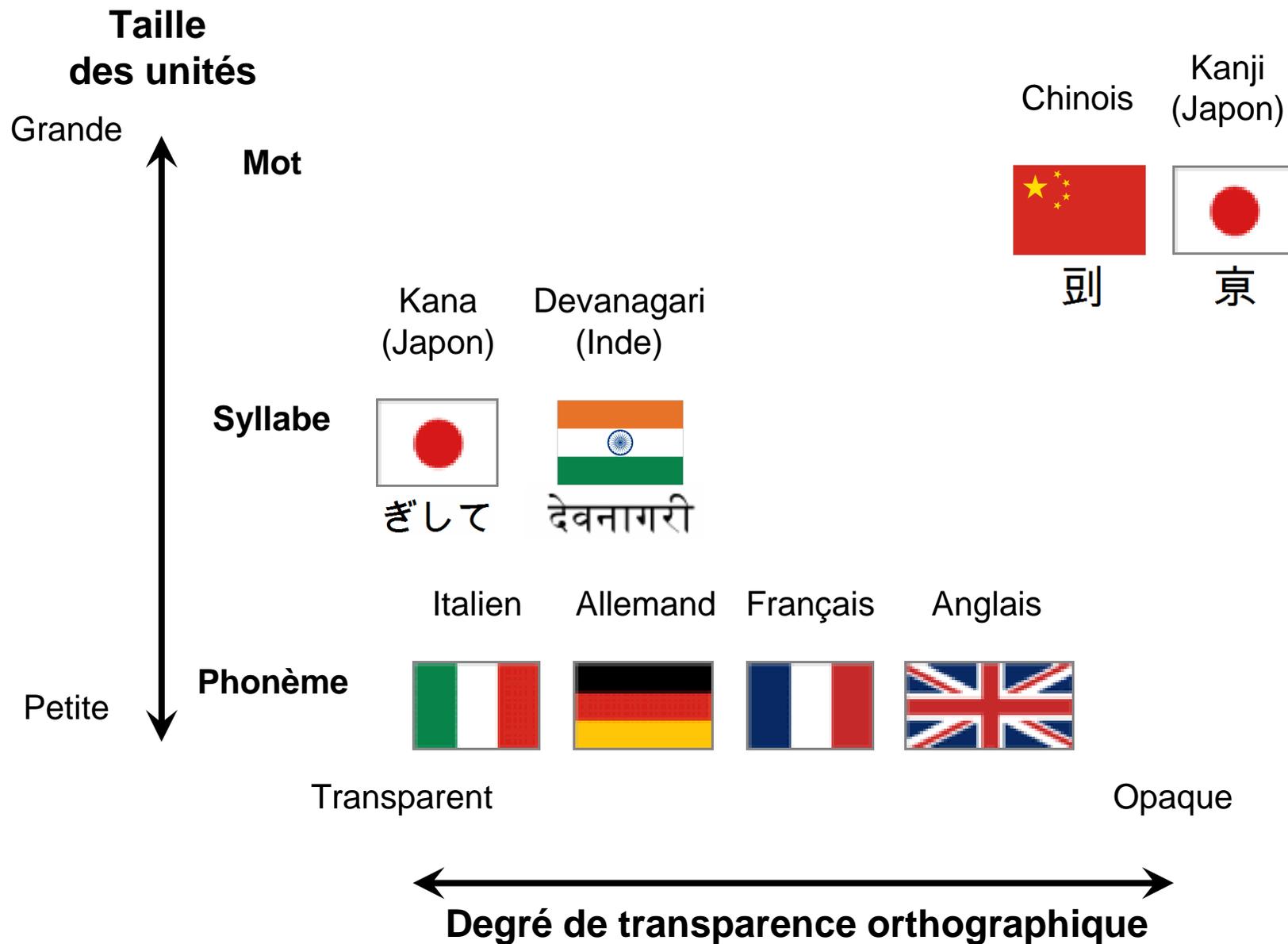
ri4 sun 日

qing1 green 青

qing2 sunshine 晴

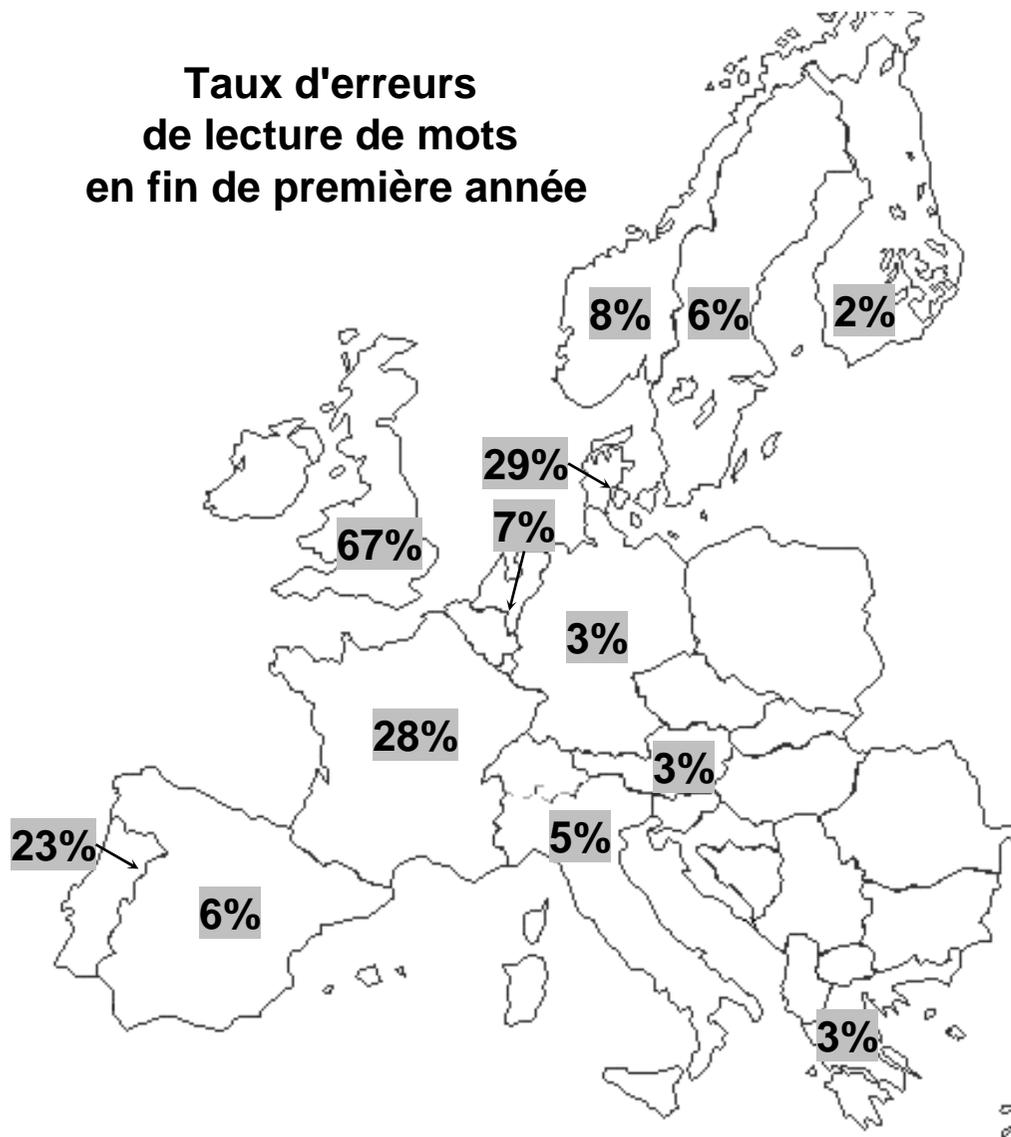
John de Francis: « the diverse oneness of writing systems »

Les systèmes d'écritures varient selon plusieurs dimensions



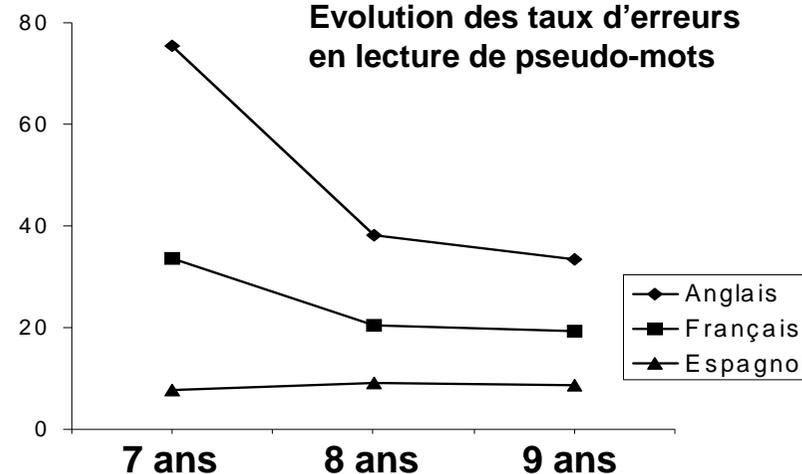
Impact de la transparence orthographique sur l'apprentissage de la lecture

Taux d'erreurs de lecture de mots en fin de première année



Seymour et coll., 2003, table 5

Evolution des taux d'erreurs en lecture de pseudo-mots

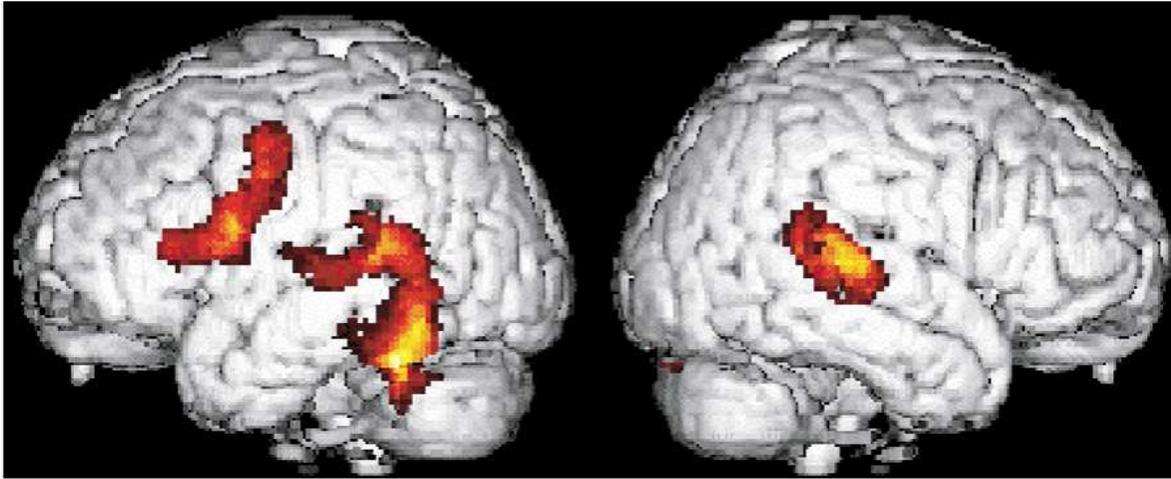


Goswami et coll., 1998, table 8

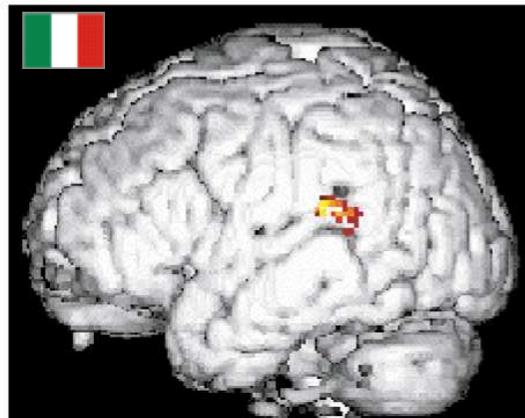
A cultural effect on brain function

nature neuroscience • volume 3 no 1 • january 2000

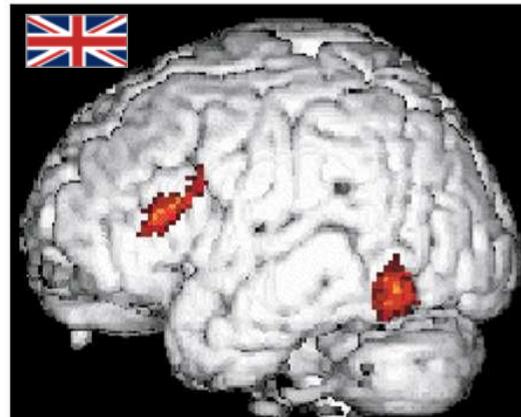
E. Paulesu¹, E. McCrory², F. Fazio¹, L. Menoncello¹, N. Brunswick³, S. F. Cappa^{4,5}, M. Cotelli⁴, G. Cossu⁶, F. Corte⁶, M. Lorusso⁷, S. Pesenti⁷, A. Gallagher², D. Perani¹, C. Price³, C. D. Frith³, and U. Frith².



Réseau commun à la lecture de l'italien et de l'anglais



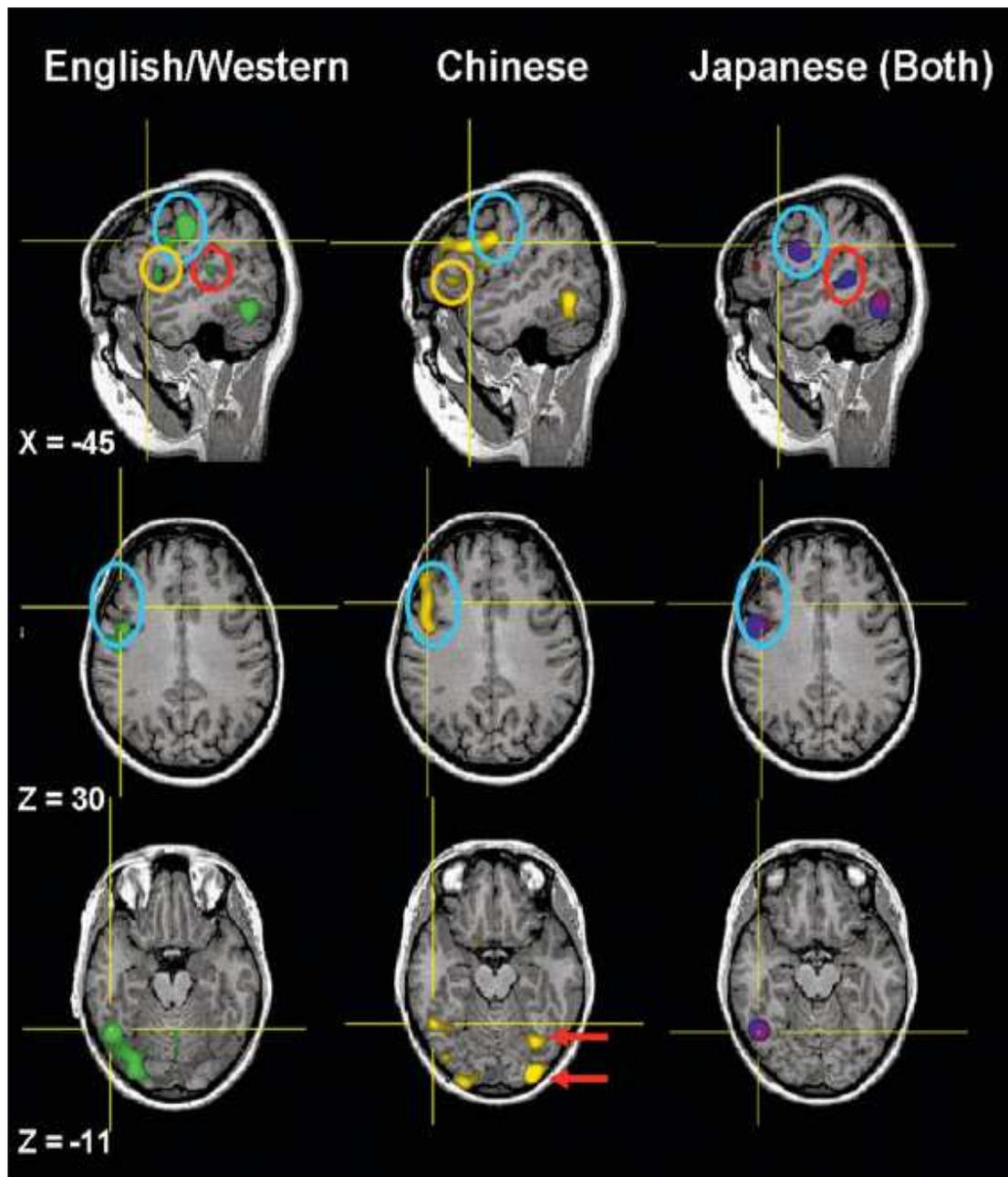
Activation plus forte en italien



Activation plus forte en anglais

- Expérience en caméra à positons
- Comparaison de lecteurs de l'italien et de l'anglais
- La lecture de mots et de pseudo-mots est près de 30 ms plus rapide en italien qu'en anglais
- Parmi un vaste réseau commun, il existe de petites différences systématiques d'activation

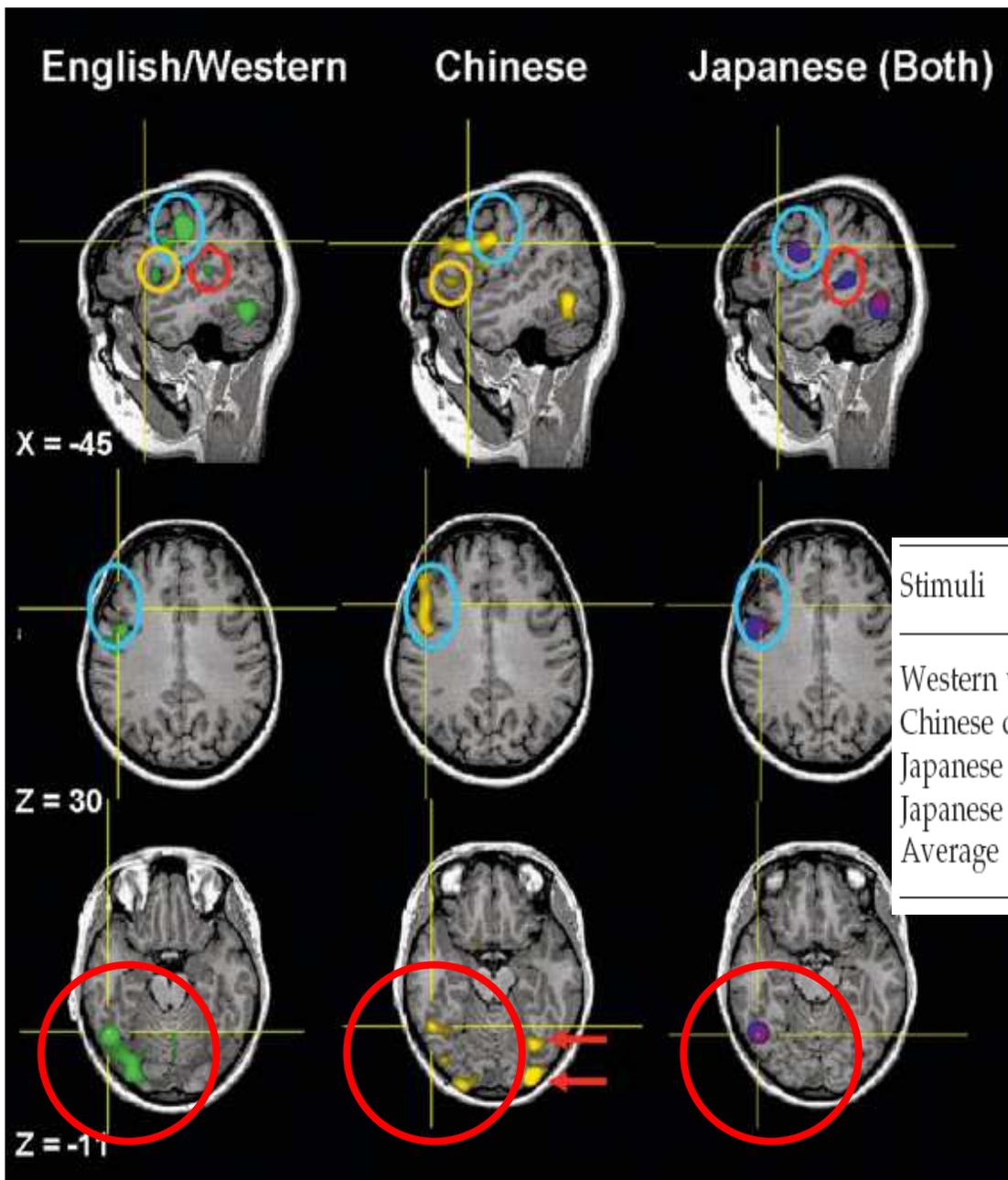
Une méta-analyse des réseaux de la lecture dans différents systèmes d'écriture (Bolger, Perfetti & Schneider, *Human Brain Mapping*, 2005)



Méthodologie:

- collecte des coordonnées d'activation par rapport au repos dans la littérature récente
- regroupement des activations selon le type d'écriture:
 - alphabétique
 - chinois
 - japonaise (regroupant Kanji et Kana)
- lissage des coordonnées par une gaussienne et moyennage
- test statistique en comparaison avec une distribution aléatoire de coordonnées.

Une méta-analyse des réseaux de la lecture dans différents systèmes d'écriture (Bolger, Perfetti & Schneider, *Human Brain Mapping*, 2005)



Premier résultat:

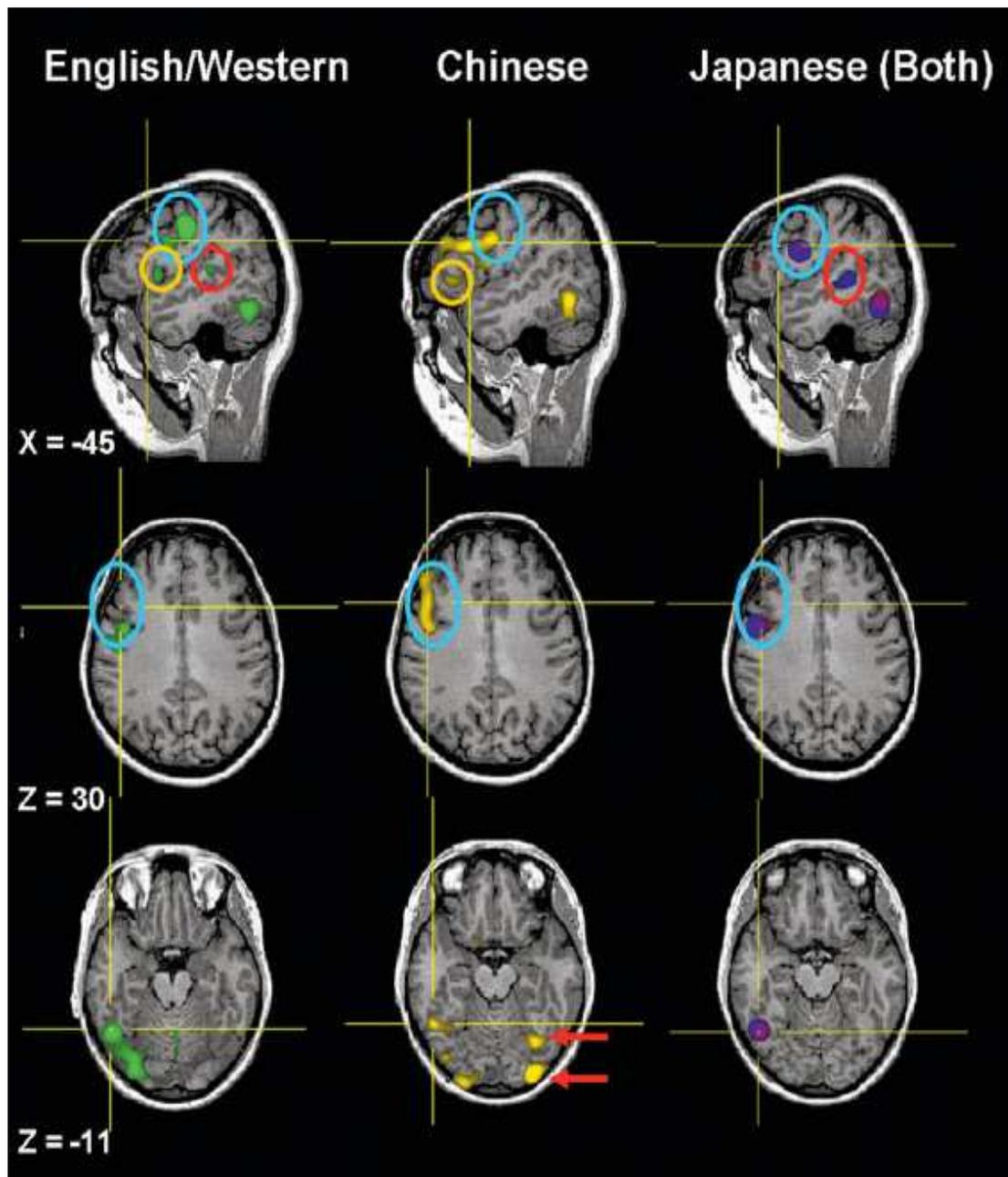
Remarquable recouvrement des activations dans la région occipito-temporale gauche (« aire de la forme visuelle des mots »)

Coordonnées proposées par Cohen et al. (2002): -42, -57, -12

Stimuli	x	y	z
Western words	-46	-56	-15
Chinese characters	-49	-53	-10
Japanese Kana	-46	-55	-8
Japanese Kanji	-47	-58	-9
Average (SD)	-47.2 (1.3)	-55.2 (1.9)	-11.6 (3.6)

La région droite semble plus activée en Chinois: codage de l'arrangement spatial plus global du caractère?

Une méta-analyse des réseaux de la lecture dans différents systèmes d'écriture (Bolger, Perfetti & Schneider, *Human Brain Mapping*, 2005)



Second résultat:

Le réseau comprend également d'autres régions plus variables:

-**région temporale inférieure et pariétale inférieure** (en rouge)

Traitement phonologique

Moindre activation pour les caractères chinois et Kanji

Possibilité d'une distinction de localisation fine, antéro-postérieure, selon la taille des unités sonores dénotées.

- **régions frontales inférieure et dorso-latérale** (en orange et bleu)

Activation plus antérieure en chinois

« Addressed phonology »... ou mémoire gestuelle du caractère?

Conclusion: Variabilité culturelle et universalité des mécanismes de la lecture

- Un réseau global universel
- toutefois modulé localement selon le système d'écriture, à la fois dans son **intensité d'activation** et dans la **position précise des pics**

