

# **Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI**

Spécialité : Neurosciences Cognitives

Présentée par :  
Felipe PEGADO

Pour obtenir le grade de Docteur de L'Université Paris VI

Sujet de Thèse:

## **Impact de l'alphabétisation sur l'organisation cérébrale et la cognition:**

**aspects de la perception visuelle et du langage parlé chez les adultes alphabétisés et non-alphabétisés**

Soutenance effectuée le 6 décembre 2011 devant le jury :

Stanislas DEHAENE              Directeur de thèse

Eraldo PAULESU              Rapporteur

F.-Xavier ALARIO              Rapporteur

Tatjana NAZIR              Examinateur

Laurent COHEN              Examinateur

## **Table de Matières :**

Résumé : .....	4
Terminologie .....	5
Introduction générale.....	7

### **PARTIE I : REVUE DE LA LITTERATURE..... 8**

#### **Chapitre 1: Impact de l'alphabétisation et de la scolarisation sur le *mode de fonctionnement cognitif* ..... 9**

Les travaux de Luria et l'hypothèse d'une cognition exclusivement concrète chez les illettrés .....	9
Expérience 1: Dénomination et catégorisation des couleurs.....	11
Expérience 2: Dénomination et classification des figures géométriques .....	11
Expérience 3: Illusions d'optique .....	12
Expérience 4: Généralisation et abstraction .....	12
Expérience 5: Détection de similarités.....	14
Expérience 6: Définition des concepts .....	15
Expérience 7: Syllogismes .....	15
Expérience 8: Résolution des problèmes .....	16
Expérience 9: Imagination .....	18
Expérience 10: Conscience de soi .....	18
Conclusion des travaux de Luria: .....	19
Un accès possible à la cognition abstraite chez les illettrés ? Les travaux post-Luria .....	19
Evidences de la cognition illettrée chez les peuples non-civilisés .....	23
Conclusion : .....	24

#### **Chapitre 2: Impact de l'alphabétisation sur le *langage parlé* et son réseau cérébral ..... 26**

Absence de "conscience phonémique" chez les illettrés .....	26
Perception catégorielle de syllabes dégradées chez les illettrés.....	32
L'alphabétisation est-elle nécessaire à la segmentation lexicale fine? .....	33
La latéralisation du langage à l'hémisphère gauche.....	35
L'impact des lésions cérébrales sur le langage parlé des lettrés et illettrés .....	35
Etudes de neuroimagerie fonctionnelle chez les illettrés sans lésion .....	40
Le cerveau illettré s'active différemment pour les pseudo-mots .....	41
Le lien sémantique plus facile que le lien phonologique chez les illettrés.....	43
Les réponses aux sons du langage moins latéralisées chez les illettrés ? .....	45
Quand on lit pour la première fois son propre dialecte .....	45
Les illettrés chinois.....	48
Conclusion:.....	49

#### **Chapitre 3: Impact de l'alphabétisation sur la *perception visuelle* et son réseau cérébral .....** 51

L'émergence d'une région spécialisé pour l'orthographe.....	51
Réponses aux mots latéralisés à l'hémisphère gauche .....	53
Invariance gauche-droite de la perception des images .....	54
L'invariance en miroir chez les animaux .....	54

L'invariance en miroir chez les bébés humains .....	57
L'invariance en miroir chez l'homme adulte .....	58
L'impact de l'alphabétisation sur l'invariance en miroir .....	59
L'impact d'une autre expertise visuelle sur l'invariance en miroir.....	61
Conclusion :.....	63
<b>Chapitre 4: Impact de l'alphabétisation sur <i>l'anatomie cérébrale</i>.....</b>	<b>64</b>
Le corps calleux illettré est plus fin sur le tiers postérieur.....	64
Conclusion:.....	67
<b>PARTIE II : NOS RECHERCHES .....</b>	<b>68</b>
Expérience 1: L'impact de l'éducation sur les circuits visuels et du langage parlé (étude IRMf).....	69
Expérience 2: L'invariance en miroir chez les lettrés (étude IRMf).....	109
Expérience 3: L'invariance en miroir chez les lettrés, illettrés et ex-illettrés (étude comportementale).....	120
<b>PARTIE III : DISCUSSION GENERALE.....</b>	<b>142</b>
Biais possibles lors des tests comportementaux chez les illettrés .....	144
Apprentissage de la lecture tout au long de la vie.....	145
L'apprentissage de la lecture et la scolarisation entraînent-ils des pertes de fonction? ....	146
Seules les dimensions pertinentes pour la lecture semblent être implémentées au niveau neuronal .....	147
Les mécanismes d'invariance en miroir et l'organisation hiérarchique de la voie ventrale .....	148
Le champ émergent de la Neuro-éducation.....	149
<b>PARTIE IV : CONCLUSION .....</b>	<b>151</b>
<b>Références Bibliographiques .....</b>	<b>154</b>

## Résumé :

L'apprentissage de la lecture a-t-il un impact sur la perception visuelle et le langage parlé ? Durant cette thèse, nous avons été amenés à étudier l'influence de l'acquisition de la lecture sur le mécanisme de 'généralisation en miroir des images', aussi connu comme 'invariance en miroir'. Ce mécanisme, qui est fonctionnel chez les bébés humains et également chez les primates non-humains et d'autres animaux, permet la reconnaissance immédiate d'une image ou d'une silhouette vue auparavant sur un autre profil (gauche ou droite). Ce mécanisme est probablement de nature adaptative dans l'évolution des primates, par exemple lorsqu'il s'agit de reconnaître un conspécifique ou détecter un prédateur. En revanche, lorsqu'on apprend à lire, cette symétrie en miroir doit être brisée afin qu'on puisse discriminer rapidement la bonne orientation des lettres et ne pas confondre par exemple un 'b' avec un 'd'. Nous avons pu montrer au niveau comportemental que des adultes *illettrés* présentent un profil de réponses invariant à l'orientation gauche-droite et cela pour tous les stimuli visuels présentés. En revanche, et comme on pouvait s'y attendre, les lettrés présentent une discrimination automatique de l'orientation, et ce même si la consigne demande explicitement de ne pas tenir compte de l'orientation de la cible. De manière plus surprenante, nous avons pu montrer que cet effet n'était pas restreint aux stimuli alphabétiques et pouvait s'observer également pour des fausses polices et, à un moindre degré, également pour des images de visages, de maisons ou d'outils. Cela suggérerait un transfert partiel de cette capacité discriminatoire au delà du domaine de la lecture. De manière surprenante, même les sujets tardivement alphabétisés (à l'âge adulte), semblent « perdre » également cette invariance en miroir, démontrant ainsi une considérable plasticité du système visuel pour ce mécanisme probablement ancien du point de vue ontogénétique et phylogénétique. Au niveau cérébral, nous avons pu mettre en évidence grâce à l'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf), que l'automaticité de cette discrimination d'orientation pour les lettres isolées dépendait du cortex occipito-temporal gauche des lecteurs adultes. Cette région est connue pour répondre à des stimuli orthographiques ('aire de la forme visuelle des mots') ou en anglais Visual Word Form Area [VWFA]. En revanche, la même région a présenté un profil de réponse invariant pour l'orientation face aux images iconiques non-alphabétiques.

Nous avons également contribué à l'étude en IRMf explorant les activations cérébrales de sujets lettrés, illettrés ou ayant été alphabétisés tardivement en réponse à divers stimuli visuels et auditifs (langage parlé). Nous avons ainsi pu constater des différences d'activation corticale selon le niveau de lecture des participants: 1/ une augmentation de l'activation dans la VWFA par des chaînes de caractères alphabétiques; 2/ une augmentation généralisée des activations en réponse aux stimuli visuels divers dans le cortex fusiforme et également dans le cortex occipital (y compris V1); 3/ augmentation des réponses induites par la perception du langage parlé dans la région phonologique du *planum temporale*; 4/ activation 'descendante' des représentations orthographiques dans la VWFA, lors de la tâche de décision lexicale auditive (où les vrais mots devraient être discriminés des pseudo-mots); cela n'a pas été le cas lors de l'écoute passive des phrases; 5/ La plupart de ces effets ont été observés également chez les sujets ayant été alphabétisés tardivement, ce qui suggère encore une grande plasticité des systèmes neuronaux qui soutiennent la lecture; 6/ un possible « recyclage » des neurones auparavant dédiés à la détection de visages ou d'objets, qui deviennent spécialisés à la détection des stimuli alphabétiques, faisant ainsi émerger la VWFA chez les lecteurs.

Nos données démontrent ainsi qu'apprendre à lire modifie profondément les circuits cérébraux de la vision et du langage. Nos résultats vont également à l'encontre de la notion de période critique pour l'alphanétisation.

**Mots-clés :** *lecture, éducation, invariance en miroir, neurosciences cognitives, neuro-éducation.*

## Terminologie

**Illettré:** Nous allons utiliser ce concept dans son acception la plus simple, celle d'un adulte qui n'a pas appris à lire ni à écrire. Comme pour la plupart des auteurs, nous considérons que la capacité d'écrire son propre nom, n'exclut pas l'illettrisme.

**Ex-illettré:** Personne alphabétisée à l'âge adulte. Le concept d'ex-illettré a été déjà évoqué dans la littérature sous le terme de "letré tardif" (par J.Morais et R. Kolinsky par exemple).

**Analphabète:** Dans un dictionnaire comme Le petit Robert, on ne trouve pas de différence entre les termes Analphabète et Illettré, tous les deux définis comme celui qui ne sait ni lire ni écrire. Certains auteurs préfèrent réservier le terme d'analphabète à celui qui n'a jamais eu de contact avec l'alphabet.

**Illettré fonctionnel:**<sup>1</sup> Adulte incapable de lire et d'écrire de façon opérationnelle même des textes simples, qu'il ait fréquenté l'école dans son enfance ou pas.

**Pseudo-mots:** chaîne de caractères qui ne constitue pas un mot réel dans une langue donnée, mais qui respecte sa structure, c'est-à-dire la fréquence d'occurrence de certains enchaînements de lettres. Les pseudo-mots sont par conséquent prononçables (lisibles).

**Voie directe** (= voie lexico-sémantique) : voie de lecture qui permet une reconnaissance directe du sens, sans faire appel au décodage phonologique.

---

<sup>1</sup> En effet il existe une certaine *polysémie* dans la terminologie lié à l'illettrisme, ce qui a un impact dans les statistiques officielles de chaque pays. Une étude dirigée sur le sujet a été mené à partir des rapports nationaux de l'UNESCO en 1990 et 2004 (Mancebo, 2005). Elle montre comment les termes "illettré" et "illettré fonctionnel" prennent différents sens selon les pays et même selon l'époque. Beaucoup de pays incluent l'*arithmétique* comme faisant partie des capacités minimales d'une personne lettrée. En outre, pour éviter la simple classification binaire (illettré ou lettré), des concepts plus nuancés comme *letré simple* ou *semi-letré* ont été utilisés au Mexique et en Corée par exemple. La Finlande considère "illettré fonctionnel" celui qui n'accède pas également aux divers media d'aujourd'hui, notamment les ordinateurs. En France le terme « d'illettré » dans le rapport de 1990 a pris le sens d'illettré fonctionnel et a inclus des capacités minimales non acquises en arithmétique, des concepts d'espace et temps et du raisonnement logique.

En plus, lorsqu'on classe un sujet en illettré ou ex-illettré, cela peut rester arbitraire pour certains d'entre eux. Citons par exemple le cas de Monsieur LM, qui nous avons pu rencontrer dans une école pour adultes à Brasilia. Sans aucune scolarité jusqu'à 60 ans, il prenait des cours depuis 4 ans. Il était capable de décoder lentement syllabe par syllabe. Il pouvait donc lire les mots courts. En revanche, lorsqu'il arrivait à la fin des mots longs et encore plus à la fin des phrases, Monsieur LM avait déjà oublié le début de celle-ci et n'accédait donc que très rarement au sens du texte. Doit-il être considéré illettré ou ex-illettré ? Il nous semble en tous cas qu'il pourrait être considéré comme un illettré fonctionnel.

**Voie indirecte** (= voie phonologique) : voie de lecture à travers le décodage graphème-phonème. L'accès au sens passe donc dans ce cas par le décodage phonologique.

**Phone/phonème** (nous utiliserons comme synonymes) : unité élémentaire de son du langage parlé capable d'être perçue de façon distincte. Ex : les sons correspondants aux graphèmes « m », « ch ».

**Graphème**: le correspondant graphique des phonèmes.

**Conscience phonologique** : capacité à manipuler mentalement les sons du langage parlé.

**Conscience phonémique** : capacité à manipuler mentalement les sons du langage parlé au niveau le plus élémentaire, à savoir, celui du phonème.

# **Introduction générale**

Dans cette thèse nous avons abordé la question de l'impact cérébral de l'apprentissage de la lecture sur certains aspects de la perception visuelle et du langage parlé. Nous nous sommes concentrés sur l'étude des *adultes* lettrés, illettrés et ex-illettrés, ce qui nous a permis de maintenir fixe le facteur confondant de la maturation cérébrale et de séparer les effets d'alphabétisation, de scolarisation ainsi que celui de l'âge d'acquisition de la lecture.

Nous nous sommes posé un certain nombre de questions au cours de cette thèse: Que savons-nous de la cognition des personnes illettrées? En quoi est-elle distincte de celle des sujets lettrés ? Que connaissons-nous sur l'organisation cérébrale des sujets qui n'ont pas eu accès à l'alphabétisation? Les systèmes cérébraux qui soutiennent la lecture restent-ils plastiques tout au long de la vie, ou dépendent-ils d'une période critique ? Comment et à quel point la culture peut-elle modifier le cerveau et la cognition des êtres humains ?

Nous allons présenter dans un premier temps (Partie I) l'état actuel des connaissances concernant l'impact de l'éducation sur la cognition et l'organisation cérébrale, en passant particulièrement en revue les recherches chez les adultes illettrés, lettrés et ex-illettrés, tout en privilégiant un format par thèmes. Nous avons également fait le choix d'une présentation plus détaillée de certaines études représentatives (ou plus rares) aux dépens de l'exhaustivité. Nous aborderons ensuite (Partie II) nos propres recherches, déjà publiées ou en préparation, dans leur format original en anglais, précédées par un bref résumé en français. Cela sera suivi d'une discussion générale (Partie III), en complément à la discussion de chaque article. Enfin, bien entendu, une conclusion synthétique sera présentée dans la dernière partie de ce manuscrit (Partie IV).

## **PARTIE I : REVUE DE LA LITTERATURE**

# **Chapitre 1: Impact de l'alphanétisation et de la scolarisation sur le mode de fonctionnement cognitif**

## **Introduction**

Les personnes n'ayant pas été à l'école, privées ainsi des enseignements théoriques, sont-elles capables d'accéder à une forme de pensée *abstraite*, dégagée du quotidien concret et immédiat? Autrement dit, les illettrés sont-ils capables d'imaginer des situations hypothétiques ?

Nous allons aborder cette question dans ce premier chapitre consacré à l'influence de l'éducation sur la capacité d'imaginer des situations théoriques. Nous allons pouvoir suivre une perspective chronologique de la littérature dans ce chapitre, en commençant avec les travaux classiques de Luria et Vigotsky pour terminer avec les données récentes.

## ***Les travaux de Luria et l'hypothèse d'une cognition exclusivement concrète chez les illettrés***

Le célèbre neuropsychologue russe Alexander Luria, ainsi que son également illustre maître Lev Vygotsky se sont intéressés depuis les années 30 à la question de l'impact de l'éducation sur la cognition. Ils se sont déplacés vers des régions très éloignées de l'ancienne Union soviétique où on pouvait trouver des communautés illettrées. Attardons-nous un peu sur cet ensemble de recherches sur la cognition des adultes illettrés, historiquement hors-pair, publié dans les années 70 (Luria, 1976). Les chercheurs ont su profiter d'une situation particulière de profonds changements d'ordre social et culturel de l'ancienne Union Soviétique, pour tester leurs hypothèses. En considérant que les activités cognitives humaines de haut niveau sont "sociohistoriques" par nature, la grande question pour Luria a été la suivante: Est-ce que, au cours du développement historique, seul le *contenu* mental est modifié ? Ou alors est-ce que la *structure* même de l'activité mentale subit des changements? En d'autres termes, les modifications mentales engendrées par les changements sociaux profonds (comme l'acquisition de la lecture), peuvent-ils générer des réorganisations mentales, de nouveaux "systèmes mentaux" ?

Leur recherche s'est déroulée dans la Région de l'Uzbekistan, société virtuellement 100% illettrée depuis des siècles, qui vivait pratiquement de la culture du coton et qui était fortement influencée par l'islamisme. L'installation d'un réseau d'écoles ouvrait l'opportunité d'apprendre les rudiments de la lecture et de l'écriture, même à l'âge adulte (on pourrait utiliser donc dans ce cas le concept d'ex-illettré). On y apprenait également des notions sur les nombres. En acceptant des gens sans aucune éducation formelle, la difficulté était, selon Luria, qu'il fallait "restructurer la conscience" des élèves, en les emmenant au-delà de l'expérience immédiate, concrète, vers la sphère théorique.

L'investigation comportait les groupes suivants:

- Femmes illettrées qui vivaient dans les Ichkari ("quartiers de femmes"), sortant rarement.
- Paysans illettrés de villages éloignés, avec une économie individualiste.
- Fermiers collectifs. A l'inverse des paysans éloignés, les fermiers collectifs s'organisaient de façon plus élaborée: planification de la production, distribution des tâches, etc. Ce groupe était hétérogène, composé d'illettrés mais aussi de sujets « plus jeunes » qui avaient reçu des cours d'alphabétisation de courte durée. Ces derniers semblent avoir été alphabétisés à l'âge adulte (donc ex-illettrés a priori) mais les âges de ces « jeunes sujets » lors de l'alphabétisation ne sont pas précisés.
- Femmes qui participaient aux cours d'alphabétisation de courte durée (ex-illettrées).
- Femmes ex-illettrées avec 2 à 3 ans d'alphabétisation, participant au cours plus avancé. Leur niveau de lecture restait assez modeste.

Les conditions de recueil des données n'étaient pas idéales comme au laboratoire. En effet les chercheurs ont dû s'adapter aux conditions locales. Par exemple, dans les Ichkari (quartiers de femmes) les interviews ont été faites par des investigateurs du sexe féminin, le début se faisant autour d'une tasse de thé et les tâches utilisées n'étant pas des tests standardisés mais des épreuves plus adaptées aux sujets vivant dans cet environnement.

Luria testait l'hypothèse que les sujets n'ayant pas eu une éducation formelle, pouvaient avoir une "réflexion graphique de la réalité" et non pas une pensée abstraite, verbale ou logique comme les personnes éduquées. Les sujets non scolarisés auraient des caractéristiques spécifiques, pas seulement dans leurs systèmes d'encodage de la réalité perceptive, mais aussi dans leurs processus de pensée eux-mêmes qui pourrait différer des éduqués. Luria a élaboré

une série d'expériences, dont la richesse qualitative des réponses verbales ne peut pas être reproduite ici. On se contentera de donner quelques exemples et de montrer certains résultats quantitatifs.

## Expérience 1: Dénomination et catégorisation des couleurs

Dans cette première expérience, on a simplement demandé aux sujets de dénommer spontanément les couleurs présentées. Les illettrés manquaient de vocabulaire spécifique et utilisaient plutôt des références de leur environnement qui présentaient la même couleur (ex. "pistache", "coton à la récolte", "dent", "lac", "ciel"...). Concernant la catégorisation, les illettrés se montraient confus pour grouper les objets d'une même classe de couleur ("on ne peut pas faire ça", "ils sont différents", "celle-ci est plus claire que celle-là"). Après une bonne dose d'insistance de la part de l'examineur, une grande partie des sujets illettrés arrivaient quand même à les classer correctement.

## Expérience 2: Dénomination et classification des figures géométriques

Dans cette nouvelle expérience, les chercheurs ont demandé aux sujets de dénommer et de classer des figures géométriques (voir exemples dans la figure 1.1).

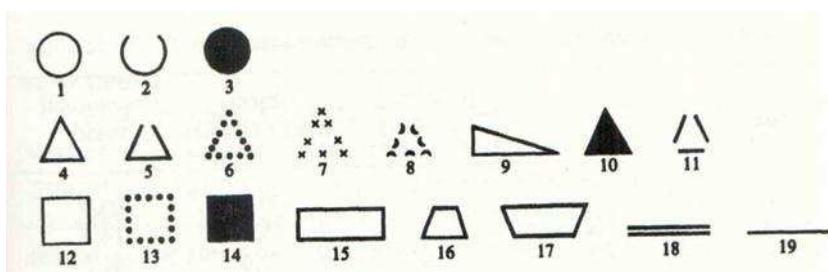


Figure 1.1: images géométriques présentées aux sujets dans l'étude de Luria (Luria, 1976)

Les illettrés n'ayant pas de vocabulaire spécifique pour les figures géométriques (cercles, triangles, etc.), utilisaient des noms d'objets dans leur environnement : "montre", "lune", "tumar" (amulette de la région), etc. Pour la catégorisation les illettrés se montraient à nouveau très gênés pour grouper les objets. Luria a pu mettre en évidence une tendance des

illettrés à classer les figures *selon l'identité* que les sujets avaient attribuée aux images ("montre", "lune") et *pas selon leurs formes* géométriques. Par exemple, l'examinateur a demandé à un des sujets illettrés: "Pouvons-nous mettre ensemble la figure 12 et 13 ?". Le sujet a répondu: "Non, ça c'est une montre et ça une carte. On ne peut pas les mettre ensemble".

### Expérience 3: Illusions d'optique

Certaines illusions semblent universelles à toutes les cultures. D'autres semblent avoir une influence culturelle déterminante. Luria cite les travaux de Rivers (1901) montrant que les peuples Toda en Inde étaient plus sensibles à une illusion sur la longueur des lignes verticales et horizontales que pour l'illusion de Müller-Lyer [numéro 6 à la figure 1.2]. Luria et ses collègues ont présenté une série d'illusions d'optique à des sujets ex-illettrés et illettrés (voir figure 1.2).

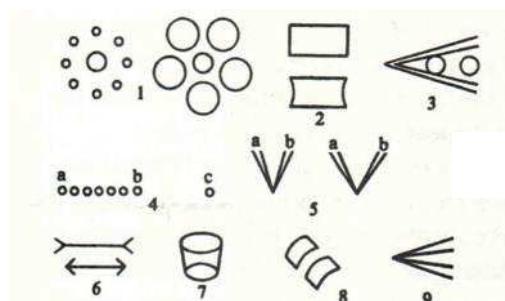


Figure 1.2: illusions d'optiques présentées aux sujets dans l'étude de Luria (Luria, 1976).

Les résultats ont montré une prévalence presque universelle de l'illusion de Müller-Lyer (illusion No.6). L'effet d'autres illusions semblaient être modulés par le niveau d'éducation, les plus éduqués étant les plus sensibles (No.3, 4, 5, 7 et 9). Malheureusement Luria n'explique pas les tâches demandées pour chaque illusion, notamment pour les moins connues d'entre elles, ce que nous empêche d'avoir un net aperçu sur cette question.

### Expérience 4: Généralisation et abstraction

Luria et ses collègues ont montré aux participants des dessins représentant des objets, comme par exemple: marteau, scie, hachette et bûche. Ils informaient les sujets que 3 de ces "choses" appartenaient à un groupe et qu'on pouvait utiliser un mot pour le désigner. Les chercheurs informaient encore que la 4<sup>e</sup> chose ne pouvait pas appartenir à ce groupe. Les sujets illettrés montraient une forte tendance à ne pas les séparer en justifiant de la façon suivante: "il faut aussi la bûche sinon le reste ne sert à rien". Même après que le concept "outils" ait été rendu explicite par le chercheur, très souvent les illettrés n'acceptaient toujours pas qu'on retire la bûche du groupe. Un autre exemple: 3 adultes et un enfant. L'examinateur demandait: "Dans ce cas, l'enfant clairement n'appartient pas à ce groupe n'est ce pas ? ". Les illettrés justifiaient qu'on ne pouvait pas les séparer, car "l'enfant doit rester avec les adultes, même pour les aider au travail".

Les auteurs ont séparé les réponses des sujets en 1/"méthode graphique de classement"; 2/"classification catégorielle" ou 3/ un mélange des deux précédentes. Il faut noter qu'une bonne dose de subjectivité a pu influencer la classification des expérimentateurs et un manque de compréhension complète de la tâche par les illettrés a pu également influencer les résultats. Malgré cela, les résultats semblent distinguer les groupes : les illettrés présentant une forte tendance à répondre en rapport à la réalité concrète et pas à une catégorisation abstraite (« outils », « adultes »), ce que n'était pas le cas des personnes ayant suivi modestement les cours à l'école (mais malheureusement présentant différentes âges), comme le montre le tableau suivant (tableau 1.1).

Group	Number of subjects	Graphic method of grouping	Graphic and categorical methods of grouping	Categorical classification
Illiterate peasants from remote villages	26	21 (80%)	4 (16%)	1 (4%)
Collective-farm activists (barely literate)	10	0	3 (30%)	7 (70%)
Young people with one to two years' schooling	12	0	0	12 (100%)

Tableau 1.1: Profil de réponses à la tâche de classification en groupes. 3 éléments de 4 devraient appartenir à un groupe selon un concept "abstrait" (« outils » par exemple) dans l'étude de Luria (Luria, 1976).

## **Expérience 5: Détection de similarités**

Dans cette tâche, les chercheurs demandaient aux participants de questions comme: "Qu'est ce qu'un chien et une poule ont de commun ?". Prenons l'exemple d'un sujet illettré qui protestait avec l'argument que les deux sont différents, « car le chien a 4 pattes mais la poule seulement 2 ; en plus la poule a des ailes et pas le chien... ». L'examineur insistait en disant : "Vous m'avez parlé des différences, mais qu'est ce qu'ils ont de commun ?". Le sujet illettré répondait alors : "ils ne sont pas similaires du tout !". L'examineur pouvait même insister: "Est-ce qu'il existe un mot pour désigner les deux?". Alors ce même sujet répondait: "Non, bien sûre que non." L'examineur continuait: "Est-ce que "animal" peut les désigner à tous les deux ?". Le sujet répondait finalement que "si", mais avait du mal à généraliser le principe, comme le montrait sa réponse à la question suivante: "Qu'est-ce-qu' un poisson et un corbeau ont de commun ?". Le sujet répondait: "Un poisson vit dans l'eau, un corbeau vole. Un corbeau peut manger un poisson mais pas le contraire".

L'examineur demandait alors si on pouvait les nommer "animaux". Le sujet répliquait que "si on les appelle "animaux" cela ne serait pas correct car un poisson n'est pas un animal ni le corbeau". Cette réponse montre qu'au moins une partie des résultats pouvait aussi s'expliquer par l'ignorance du concept même évoqué, malgré l'utilisation d'un vocabulaire simple et adapté au quotidien des sujets. Néanmoins, cela ne semblait pas être le cas dans les groupes modestement lettrés qui partageaient des environnements socioculturels à priori comparables.

Notons enfin deux autres exemples qui n'évoquent pas des réponses erronées mais qui témoignent encore une fois du style de réponses spontanées des illettrés: "Qu'est-ce que le sang et l'eau ont en commun?". Un sujet illettré a répondu: "L'eau est capable de nettoyer tous les types de saletés, y compris le sang". Une autre question : "Qu'est ce qu'une rose et un concombre ont de commun ?". Un illettré a pu répondre "Tous les deux se développent". Ces réponses, qui ne sont pas fausses, illustrent comment les illettrés ont du mal à « jouer le jeu » de la classification catégorielle abstraite, ce qui est rapidement acquis après un peu de contact avec l'éducation formelle, même à l'âge adulte.

## **Expérience 6: Définition des concepts**

Les chercheurs ont demandé alors aux sujets d'expliquer certains concepts de leur quotidien (par ex. "arbre", "voiture", "soleil", etc), tout en évitant des notions plus abstraites comme "liberté" ou "coopération". Malgré cela, certains illettrés protestaient contre la raison de ce test car "tout le monde sait ce qu'est un arbre". Après insistance de l'examinateur en disant que certaines personnes n'ont jamais vu des arbres, les sujets avaient alors une tendance à répondre comment planter un arbre ou comment une voiture marche ("on met l'essence, une personne la conduit" ...), mais pas à les définir. Certains allaient jusqu'à dire "si une personne n'a jamais vu une voiture elle est incapable de comprendre ce qu'est une voiture".

## **Expérience 7: Syllogismes**

Luria et ses collaborateurs ont utilisé des syllogismes afin de vérifier si les illettrés étaient capables de suivre un raisonnement logique et hypothétique. Ils commençaient par demander aux sujets de répéter les prémisses et la question avant d'y répondre. Voyons un exemple: "Des ours blancs existent seulement aux endroits où il fait très froid et où il y a de la neige. Des cocons de soie existent seulement là où il fait très chaud. Existe-t-il des endroits avec des ours blancs et des cocons de soie à la fois?". Déjà à l'étape de répétition, les illettrés se trompaient de façon assez systématique, comme dans l'exemple suivant: "Où il existe de la neige blanche existe aussi des ours blancs. Où il fait chaud existe-t-il des cocons ou pas ?".

En réalité, deux types de syllogismes ont été utilisés:

- familiers à leur expérience quotidienne (ex."Le coton pousse bien où il fait chaud et sec. En Angleterre il fait froid et humide. Est-ce que le coton peut bien pousser en Angleterre ?");
- sans présenter une familiarité au quotidien des sujets (ex. "A l'extrême-nord, où il y a de la neige, tous les ours sont blancs. Novaya Zemlya est situé à l'extrême-nord. De quel couleur sont les ours là-bas ?").

Pour ce dernier type de syllogisme, plusieurs illettrés ont même refusé les prémisses en disant qu'ils n'ont jamais été à l'extrême-nord, et que pour répondre à cette question il fallait demander aux gens qui avaient déjà été sur place et vu les choses. Selon les

chercheurs, la réponse spontanée typique était un complet déni de la possibilité d'inférer des conclusions sans une expérience personnelle. Après la réponse spontanée des sujets, Luria et collaborateurs les invitaient à accéder à un mode hypothétique, en ajoutant le commentaire suivant: "Ok, mais d'après mes mots" ou "ok, mais qu'est ce que mes mots suggèrent ?". Les illettrés ont pu ainsi modifier leurs réponses, ayant une performance 100% correcte pour les situations familières, mais ce changement a été bien plus modeste pour les situations non-familierées. Malheureusement, l'âge des groupes de sujets semble différente ici également. Le tableau 1.2 résume les résultats de l'épreuve de syllogismes:

Group	Solution	Syllogisms associated with experience		Syllogisms not associated with experience	
		Unsolved	Solved	Unsolved	Solved
Illiterate peasants from remote villages (15 subjects)	Immediate solution	6 (40%)	9 (60%)	13 (85%)	2 (15%)
	After conditional assumption ("from your words I can gather that . . .")	—	6 (40%)	8 (60%)	4 (30%)
Young people with short-term education, farm activists (15 subjects)	Immediate solution	0	15(100%)	0	15(100%)

Tableau 1.2 : Résultats de l'épreuve de syllogismes dans l'étude de Luria (Luria, 1976)

## Expérience 8: Résolution des problèmes

La résolution de problèmes simples, demandant des opérations mathématiques élémentaires, dépend-elle d'une éducation formelle? Les chercheurs ont présenté des problèmes mathématiques sur une forme concrète. Un exemple d'addition : "La distance de la ville A à la ville B est de 5km. Et de 3 km la ville B à la ville C. Quelle est la distance de ville A à la ville C ?". En effet deux versions des problèmes ont été présentées : une dont le contenu correspondaient exactement à leurs expériences pratiques quotidiennes (par ex. les

distances entre les villes étaient réelles); et une deuxième version, où les problèmes *contredisait* leurs expériences pratiques (ex. distances altérés). Selon Luria, cette deuxième version demanderait alors que le sujet puisse se dégager pleinement de leur expérience concrète pour entrer dans un mode de raisonnement hypothétique. En générale ces problèmes en contradiction avec leurs expériences suscitaient des vives protestations.

Un autre exemple, pour lequel l'opération mathématique demandée était la division: "Il faut 30 minutes pour aller à pied au village X. On peut y aller 5 fois plus rapidement en vélo. Combien de temps il faut pour y aller en vélo?". Les réponses des illettrés étaient basées surtout sur leurs expériences personnelles ou alors étaient des réponses approximées (ex. "Probablement en 1 ou 2 minutes"). Les chercheurs ont répliqué dans cette épreuve de division les résultats rencontrées à celle d'addition : chez les illettrés une performance nettement supérieure pour les problèmes « simples » (en accord avec leurs expériences quotidienne) que pour ceux « en conflit » avec leurs propres expériences. Le bénéfice de l'aide de l'examineur, en précisant qu'il s'agissait d'une situation hypothétique, n'a pas été retrouvé pour les problèmes en contradiction avec leur réalité quotidienne. De nouveau, ces épreuves n'ont pas présenté des difficultés aux ex-illettrés, mais encore une fois l'âge n'était pas équivalent entre les groupes (voir tableau 1.3).

		Simple problems		Conflict problems	
Group	Solution	Unsolved	Solved	Unsolved	Solved
Illiterate peasants from remote villages (16 subjects)	Immediate solution	4 (25%)	12 (75%)	13 (81%)	3 (19%)
	After conditions made more specific	0	16 (100%)	12 (75%)	4 (25%)
Young people with short-term education (7 subjects)	Immediate solution	0	7 (100%)	0	7 (100%)

Tableau 1.3: Epreuve de résolution des problèmes mathématiques élémentaires dans l'étude de Luria (Luria, 1976).

## **Expérience 9: Imagination**

Dans cette expérience, les chercheurs ont simplement dit aux sujets: "Vous pouvez me poser librement des questions". Environ 60% des 21 illettrés ont refusé de le faire en disant qu'ils ne savaient pas quoi demander et que pour poser des questions il fallait avoir des connaissances, « ce que nous n'avons pas » disaient-ils typiquement. Pour essayer d'aider les sujets, les chercheurs ajoutaient qu'ils vivaient à Moscou et qu'ils pouvaient répondre à des questions concernant la vie à différents endroits. Malgré cela une bonne partie des sujets illettrés résistait à poser des questions en justifiant qu'ils n'avaient jamais été nulle part ou alors en se demandant comment ils pouvaient poser des questions sur des villes qu'ils n'avaient jamais vu auparavant. Néanmoins avec l'aide d'une situation imaginaire, 40% des illettrés ont pu formuler des questions. La situation était bien différente chez les ex-illettrés avec un ou deux ans de scolarité qui posaient des questions dans 100% des cas (avec ou sans aide).

## **Expérience 10: Conscience de soi**

Les chercheurs ont voulu tester également la capacité de réflexion des sujets sur eux-mêmes, sur leur propre vie mentale. Les auteurs ont posé donc des questions sur leurs traits de personnalité, leurs qualités et défauts, ce qu'ils aimeraient changer en eux-mêmes, etc. Luria nous a ainsi révélé que les problèmes pointés par les illettrés concernaient surtout leur biens matériels, pas eux-mêmes, leur personnalité, leur psychologie, suggérant une manque d'introspection chez les illettrés. Voici quelques exemples: "J'aimerais être bien, mais maintenant je suis mauvaise car j'ai très peu de vêtements, donc je ne peux pas aller dans d'autres villages comme ça"; "Qu'est ce que je peux dire sur moi? Demandez aux autres, ils peuvent dire sur moi, pas moi-même"; "Je viens de Uch-Kurgan, j'étais très pauvre et maintenant je suis marié et j'ai un enfant"; "Si j'ai l'argent j'achète des choses et je suis heureux, mais si je n'ai pas des choses je suis malheureux". Encore une fois 65% des illettrés refusaient une analyse introspective mais la totalité des ex-illettrés s'en montrait capable.

## **Conclusion des travaux de Luria:**

Les travaux de Luria semblent montrer que les illettrés utilisent spontanément ("par défaut") une modalité de cognition plutôt basé sur leurs expériences concrètes, quotidiennes. Dans les situations de test, ils ont difficilement utilisé un mode de cognition basé sur des catégories abstraites (conceptuelles) ou sur les situations hypothétiques. Toutefois, avec l'aide de l'examineur, de nombreux illettrés ont finalement pu faire les tâches conceptuelles/hypothétiques, sauf pour les conditions en *contradiction* avec leurs expériences quotidiennes (ex. distance altérée entre deux villes connues), où des performances très faibles, malgré l'aide de l'examineur, ont été observées.

Plusieurs problèmes dans la méthodologie de ces recherches ont pu, toutefois, être observés: les conditions de recueil des données (non-standardisées, parfois en groupe), le classement fort subjectif des réponses des sujets par les chercheurs (sans être « aveugle » au groupe d'appartenance du sujet et sans mesures de cohérence inter-juges par exemple), l'âge des groupes pas toujours équivalent, etc. Malgré l'absence de ces contrôles, les résultats très différents chez les sujets modestement éduqués, appartenant à des milieux à priori comparables à ceux des illettrés, suggèrent que l'éducation a pu jouer un rôle dans ce changement de style cognitif vers une cognition spontanément plus abstraite/hypothétique.

Des travaux plus récents ont pu utiliser une bien meilleure méthodologie pour étudier des illettrés (Dias et al., 2005), également en communautés éloignées et même non-civilisées, comme la tribu indienne des mundurukus au Brésil (Pica et al., 2004; Dehaene et al., 2006, 2008). De plus, on commence à mettre en évidence les bases cérébrales du raisonnement hypothétique (Reverberi et al., 2007, 2010).

## ***Un accès possible à la cognition abstraite chez les illettrés ? Les travaux post-Luria***

A la suite des travaux de Luria, certains auteurs ont répliqué ses résultats chez d'autres groupes culturels, comme en Liberia et au Mexique (Cole, 1971; Scribner, 1977; Scribner & Cole, 1981; cités dans Dias et al., 2005).

D'après Dias et ses collègues, Scribner (1977) a pu montrer que 2 ou 3 ans de scolarité sont suffisants pour faire émerger une capacité "analytique" (dans le sens de pouvoir raisonner à partir de prémisses non familières à sa réalité quotidienne) et d'arriver à des conclusions correctes (Dias et al., 2005). Scribner, en utilisant des syllogismes similaires à Luria, demandait aux participants d'expliquer également les raisons de leurs conclusions. D'une part, les réponses "empiriques" des illettrés étaient basées sur leurs expériences personnelles ou étaient formulées à partir de généralisations des faits bien connus. D'autre part, les réponses "analytiques" des lettrés ont été plutôt basées sur les prémisses évoquées par l'expérimentateur (ex. "selon ce que vous avez dit..." ou "si vous dites que....donc...").

Est-ce que les enfants, au cours de leurs premières années à l'école, subissent ce changement d'une cognition plutôt "empirique" à celle plus abstraite, plus "analytique"? Scribner semble proposer que cela soit le cas, étant donné qu'à l'école, les enfants en classe sont confrontés très souvent à des concepts abstraits et à des situations hypothétiques distantes de la réalité concrète.

Néanmoins plusieurs auteurs semblent avoir montré que les jeunes enfants préscolaires, théoriquement donc dans la phase "empirique", étaient déjà capables d'utiliser un raisonnement hypothétique pour résoudre certains problèmes si l'expérimentateur les invitait à accepter les prémisses non familières, "comme si cela se passait sur une autre planète" ou en racontant la situation comme une histoire fantastique (Dias & Harris, 1988, 1990; Harris, 2001; Leevers&Harris, 1999, 2000; Richards & Sanderson, 1999 ; cités d'après Dias, 2005). De plus, les justifications des conclusions des enfants se fondaient sur une base hypothétique et pas empirique. Alors comment expliquer que les *enfants préscolaires* seraient prêts au raisonnement hypothétique, alors que cela ne semblait pas être le cas chez les *adultes non scolarisés*?

Afin d'élucider ce paradoxe, Maria Dias de l'université de Pernambuco-Brésil et Paul Harris de l'université de Harvard ont testé des adultes non scolarisés à Recife, au nord-est du Brésil (Dias et al., 2005). Ils ont appliqué aux adultes le même artifice utilisé chez les enfants, c'est-à-dire de demander aux participants d'imaginer la situation sur une autre planète. Les chercheurs voulaient vérifier si les adultes illettrés et également les ex-illettrés seraient capables d'avoir un raisonnement hypothétique dégagé de la réalité concrète. Pour bien contrôler l'influence de l'artifice ils ont donné explicitement cette consigne seulement à la

moitié des sujets de chacun de 2 groupes (illettrés et ex-illetterés). Au total, 24 sujets illettrés et 24 ex-illetterés, d'une moyenne d'âge d'environ 30 ans (18 à 50 ans) ont participé à l'étude.

Deux types de problèmes (syllogismes) ont été présentés: soit ils étaient fondés sur des questions *inconnues* aux sujets, comme "tous les leucocytes sont blancs", soit ils étaient en *contradiction* avec leur réalité quotidienne, comme "tous les laits sont noirs". Les auteurs ont conçu 6 syllogismes de chaque type, en demandant des réponses binaires "oui" ou "non" à la question posée après les prémisses, comme par exemple "Tous les sangs sont bleus. Paul a du sang sur son t-shirt. C'est rouge ?". Après la réponse il a été demandé aux sujets de la justifier. Les justifications ont été alors classées par les examinateurs en 1/ *empirique* (basée sur leurs expériences quotidiennes, sans prendre en compte les prémisses), 2/ *analytique* (basée sur les prémisses données) ou encore 3/ *arbitraire* (justification non pertinente ou pas de justification). Afin de réduire l'impact de la subjectivité dans les jugements, deux juges indépendants ont été utilisés. Leur jugement concordait dans 93% des cas et les réponses non concordantes ont été décidées par un troisième juge.

Les auteurs ont imaginé que si les adultes non scolarisés, au contraire des enfants préscolaires, étaient incapables d'utiliser un mode de raisonnement hypothétique (« analytique »), cela pourrait être dû au fait que les enfants (au moins dans les cultures occidentales) "pratiquaient" spontanément cela avant même l'âge scolaire (ex. jeu de faire semblant, les histoires fantastiques qui sont lues à l'enfant, le contact avec l'adulte qui les poussent à "imaginer" hypothétiquement des situations, etc.). Cette pratique mentale pourrait être absente chez les adultes illettrés des milieux défavorisés, où les activités manuelles et concrètes prédominent.

Alternativement, si les adultes non scolarisés étaient capables de faire la tâche et de justifier leurs réponses sur la base des prémisses (et pas sur leurs expériences concrètes), notamment si incités à imaginer la situation "sur une autre planète", cela montrerait alors que le raisonnement hypothétique est une capacité humaine naturelle, qui émerge en l'absence de scolarité.

Le tableau 1.4 représente les résultats (illettrés et ex-illetterés confondus), en nombre de réponses correctes par condition (total de 6 items par condition):

**TABLE 1**

*Mean Number of Correct Responses, Analytic Justifications, and Empirical Justifications by Condition (Standard vs. Planet) and Problem Content (Unknown vs. Contrary)*

Measure	Unknown content		Contrary content	
	Standard	Planet	Standard	Planet
Correct responses	2.38 (1.13)	3.87 (0.85)	1.33 (0.99)	3.79 (0.70)
Analytic justifications	1.00 (0.94)	3.26 (0.75)	0.00 (0.00)	3.33 (0.70)
Empirical justifications	0.96 (0.89)	2.25 (0.45)	5.33 (0.80)	2.29 (0.85)

**Note.** Standard deviations are in parentheses.

*Tableau 1.4: Résultats de l'épreuve des syllogismes dans l'étude de Maria Dias (Dias et al., 2005), représentés en nombre de réponses correctes (sur un total de 6 réponses).*

Dans la condition « autre planète », les performances ont été d'une part bien meilleures et d'autre part avec plus de justifications "analytiques" que pour la condition « standard ».

L'effet "autre planète" s'observe sur les deux types de contenu des syllogismes ("inconnu" aux participants et "contraire" à leurs connaissances). Mais il existe également une interaction de la condition avec le contenu des syllogismes: l'effet "autre planète" est spécialement intense lorsque le contenu des syllogismes est "contraire" à leurs connaissances. On note dans ce cas, un changement brutal du type des justifications: de presque totalement "empiriques" à majoritairement "analytiques". Malgré le fait que les ex-illettrés ont montré une performance meilleure que les illettrés, il n'y a pas eu d'interaction de groupe avec condition ou contenu. Il n'a pas eu non plus de différences de groupe concernant le type de justifications.

En résumé, les résultats de Dias et collaborateurs montrent que les illettrés et les ex-illettrés, améliorent leurs performances et donnent plus de justifications analytiques dans la tâche des syllogismes lorsqu'ils sont *explicitement* orientés à imaginer la situation, de manière dégagé de leur réalité concrète quotidienne (condition "autre planète"). Les données suggèrent que même l'adulte sans scolarisation et dont le quotidien reste essentiellement "concret" est capable d'accéder à ce type de raisonnement imaginatif, abstrait en quelque sorte, si on lui explique bien qu'il s'agit d'une *tache hypothétique*.

L'ensemble de ces travaux semble suggérer que le raisonnement illettré *par défaut* serait essentiellement concret mais une fois explicitement sollicité il serait possible à un illettré de passer à un mode abstrait/hypothétique. En effet les illettrés, vivant un quotidien fort concret (activités essentiellement manuelles, manque d'activités culturelles demandant

une abstraction, etc) n'ont peut être pas beaucoup d'opportunités de passer à un mode abstrait/hypothétique. Ces recherches ont pourtant montré qu'ils peuvent, malgré le manque d'habitude, accéder à l'abstraction. Cela reste cohérent avec le fait que les jeunes enfants de 3 ou 4 ans présentent déjà cette faculté lorsqu'ils jouent le « jeu de rôle » par exemple. Evidemment la scolarisation formelle favorise ce type de cognition abstraite, qui devient alors très naturelle. Sauf peut-être chez certains patients présentant des lésions neurologiques graves, la pensée hypothétique, serait donc universelle et présente assez tôt dans le développement ontogénétique.

### ***Evidences de la cognition illettrée chez les peuples non-civilisés***

Des travaux contemporains ont pu être menés chez des populations illettrées indigènes au Brésil : les mundurukus. Une première question abordée a concerné l'influence du langage sur la cognition mathématique (Pica et al., 2004). La population étudiée possédait en effet un vocabulaire précis des numérosités mais restreint aux 5 premiers nombres seulement, les numérosités supérieures à 5 étaient imprécises (« un peu », « vraiment beaucoup », etc). Les chercheurs ont utilisé des éléments familiers à leur quotidien (des boîtes d'une part et d'autre part des points qui pourraient ressembler à des ‘graines’ ou des petits fruits), tout en les présentant d'une façon reproductible d'un sujet à l'autre sur un écran d'ordinateur. Les tâches demandées aux sujets étaient de comparer les numérosités et de réaliser des additions et des soustractions élémentaires avec ces éléments ‘concrets’. Les résultats ont montré que les illettrés mundurukus étaient capables de faire des calculs *approximatifs* avec de grandes numérosités mais étaient incapables de mener de simples calculs *exacts* lorsque les numérosités utilisées dans le calcul dépassaient 4 ou 5. Ces résultats suggèrent deux systèmes de calcul : un approximatif (indépendant du langage) et un autre exact (dépendant d'un vocabulaire précis des numérosités).

Dans un travail postérieur, les chercheurs ont testé la correspondance entre nombre et espace sur cette même population et sur des contrôles (Dehaene et al., 2008). La tâche consistait à pointer l'endroit sur une ligne qui liait deux numérosités (1 à 100 par exemple). Les sujets devraient « marquer » différents points intermédiaires de cette ligne en correspondance à la numérosité présenté. Alors que les sujets contrôle présentaient des réponses précises tout au long de la ligne numérique, témoignant d'une représentation interne linéaire, les mundurukus en contrepartie ont présenté un patron logarithmique de

correspondance nombre-espace, évoquant donc une « compression » de la ‘ligne mentale numérique’ pour les grands nombres. En conclusion, la correspondance nombre-espace est intuitive et ne nécessite pas de scolarisation pour émerger, mais elle est initialement logarithmique. En revanche, avec la scolarisation une nouvelle représentation mentale peut alors émerger : la représentation exacte des numérosités dans l'espace.

De plus, les mêmes auteurs se sont intéressés aux compétences géométriques spontanées, en absence de toute scolarisation (Dehaene et al., 2006). Ils ont testé la même population munduruku avec diverses tâches présentant des images géométriques où les sujets devaient indiquer l'élément différent (« l'intrus ») parmi six choix possibles. Pour détecter l'intrus, la distinction entre les éléments faisait appel aux notions de ligne, point, parallélisme, angle droit. Les mundurukus ont pu bien faire la tâche. De plus ils ont utilisé des notions comme distance, angle et rapport entre les éléments pour s'orienter avec un plan dans une deuxième tâche. Ces résultats suggèrent que les notions géométriques fondamentales sont intuitives et émergent même sans scolarisation.

## **Conclusion :**

Les travaux de Luria, malgré le manque de conditions expérimentales bien contrôlées, semblent avoir mis en évidence la prévalence importante chez les illettrés d'un mode de fonctionnement cognitif ‘concret’, peu dégagé de la réalité quotidienne (Luria, 1976). En réalité, l'ensemble des résultats suggèrent plus précisément que les illettrés auraient une difficulté à adopter *spontanément* un mode de fonctionnement cognitif hypothétique ou abstrait, mais cela ne serait pas une incapacité absolue. En effet, avec l'aide de l'expérimentateur, les illettrés ont pu se montrer capables d'accéder à une cognition abstraite, sauf si la situation hypothétique entraîne en contradiction directe avec sa propre réalité quotidienne (ex. fausse distance entre deux villes connues).

Dans les études plus récentes et mieux contrôlées, des chercheurs ont pu montrer plus clairement ce changement possible vers un mode de fonctionnement cognitif hypothétique, dégagé de la réalité concrète (Dias et al., 2005). Pour cela ils ont dû se servir d'un artifice pour induire le raisonnement hypothétique, à savoir, demander aux sujets illettrés d'imaginer la situation ‘sur une autre planète’.

Des recherches bien contrôlés avec les illettrés sont possibles et représentent une opportunité unique de mettre en évidence les compétences spontanément acquises sans l'éducation formelle (comme les notions géométriques et le calcul approximatif) d'une part et d'autre part celles acquises seulement avec la scolarisation (comme le calcul exact et la représentation interne linéaire entre nombre et espace) (Pica et al., 2004; Dehaene et al., 2006, 2008).

## **Chapitre 2: Impact de l'alphabétisation sur le *langage parlé* et son réseau cérébral**

### **Introduction**

Une personne illettrée, malgré une limitation lexicale attendue, est parfaitement capable de s'exprimer et de comprendre *oralement* autrui. Mais, est-ce que le fait d'apprendre une forme *écrite* de langage a un impact sur le langage oral ? Est-ce que l'apprentissage de la conversion graphème-phonème lors de la lecture, et celle du phonème-graphème lors de l'écriture, rendent par exemple notre perception *phonologique* plus raffinée ? L'apprentissage de la lecture a-t-il un impact considérable sur le réseau neuronal du langage ? Est-ce que le développement de régions sensibles à la détection visuelle des mots sur l'hémisphère gauche est du à des raisons intrinsèques à cet hémisphère (considéré plus analytique que holistique par exemple) ? Ou est-ce que c'est le langage oral qui en se développant à gauche induit ensuite le développement d'une zone spécialisée pour la détection de l'orthographe dans ce même hémisphère ? Est-ce qu'une lésion cérébrale chez une personne illettrée produit les mêmes déficits de langage que chez les lettrés ? Ou, au contraire, le fait de spécialiser davantage des régions cérébrales avec la pratique de la lecture va-t-il rendre plus difficile la récupération de patients cérébro-lésés ? Faisons un bref survol de la littérature concernant ces questions.

### ***Absence de "conscience phonémique" chez les illettrés***

Les systèmes d'écriture permettent une représentation *visuelle* des sons du langage parlé, sous la forme de symboles écrits. En d'autres termes, ils permettent la mise en correspondance entre les sons parlés et les mots écrits. Dans les systèmes alphabétiques, cette correspondance se fait précisément entre les phonèmes et les graphèmes. Certaines langues comme l'anglais et à un moindre degré le français présentant une correspondance plus irrégulière (dites langues opaques) que d'autres langues comme l'italien ou l'espagnol (dites transparentes). L'intense entraînement de ce décodage graphème-phonème que les personnes lettrées pratiquent quotidiennement pourrait favoriser indirectement le développement d'une

meilleure représentation interne des sons du langage parlé à l'échelle atomique du phonème. Est-ce que les illettrés discriminent les *sons parlés* moins bien que nous lettrés? A quel niveau de la hiérarchie (phonèmes, syllabes, morphèmes, mots...) les différences entre les groupes seraient-elles évidentes?

Dans une étude classique, le chercheur José Morais et ses collègues de l'université de Bruxelles et Lisbonne (Morais et al., 1979) ont pu montrer que la capacité des illettrés à ajouter ou supprimer un *phonème* à un pseudo-mot est bien inférieure à des ex-illettrés issus du même environnement socio-économique (19% versus 72% de réussite). Quinze sujets de chaque groupe ont été testés pour une tâche d'addition des phonèmes et le même nombre pour une tâche de soustraction (60 sujets au total). Le tableau des résultats est reproduit ci-dessous (tableau 2.1).

**Table 1.** *Mean percentages of correct responses for each type of trial, task, and group of subjects. In parentheses, the percentage of subjects who attained 100% of correct responses.*

Trials Subjects	Task			
	Addition		Deletion	
	W	NW	W	NW
I	46 (13)	19 (0)	26 (7)	19 (0)
R	91 (33)	71 (13)	87 (47)	73 (27)

*Tableau 2.1 : Réponses correctes dans les tâches d'addition et délétion de phonèmes dans l'étude de Morais et collaborateurs, pour les illettrés (I) et ex-illettrés (R) (Morais et al., 1979).*

Il est intéressant de noter que les performances des illettrés ont été similaires à celles des élèves belges de 6 ans, préscolaires (Alegria, Morais et al., 1979 ; cité en (Morais et al., 1979)). En plus la performance des ex-illettrés a été comparable à celles des enfants de 7 ans dans leur deuxième année d'alphanumerisation (équivalent au CE1 en France), testés au quatrième mois de scolarisation. Donc même l'alphanumerisation tardive (ex-illettrés) était capable de changer considérablement les performances des sujets aux tâches de manipulation phonologique au niveau du phonème.

Dans un deuxième travail, Morais et collaborateurs ont effectué une série de tests afin d'avoir un aperçu plus vaste de l'impact de l'alphabétisation sur les capacités langagières (Morais et al., 1987a). Une vingtaine d'illettrés et le même nombre de sujets ex-illettrés ont été évalués. Ce dernier groupe a été classé en bon et mauvais lecteurs selon leurs vitesses de lecture (respectivement supérieur ou inférieur à 60 mots/minute). Les épreuves et leurs résultats ont été les suivants:

**1/ segmentation du langage parlé:** suppression du premier (i) phonème ou (ii) syllabe de pseudo-mots. Les illettrés ont eu des performances significativement inférieures aux ex-illettrés pour les deux niveaux. Précisons que la différence entre les groupes était plus marquée au niveau des phonèmes que des syllabes.

**2/ tâche contrôle** (même chose mais pour une *mélodie*): les sujets devaient reproduire oralement la mélodie joué avec une clarinette par l'expérimentateur, tout en supprimant la première note. La tâche a été difficile pour tous les sujets, compte tenu des performances assez mauvaises en général (ou serait-ce une conséquence d'une cotation trop sévère ? car un composant subjectif dans cette évaluation [A-t-il bien reproduit le son ?] semble certain). Il n'y a pas eu de différence significative entre illettrés et ex-illettrés. Mais si on sépare les ex-illettrés entre bons et mauvais lecteurs, les bons lecteurs sont significativement meilleurs que les mauvais et que les illettrés. Ce résultat peut suggérer un *transfert* de cette discrimination sonore en dehors du domaine verbal lorsque les ex-illettrés deviennent plus performants.

Voici les résultats (tableau 2.2):

**Table 1.** *Segmentation of speech sounds and musical segmentation. Mean percentage of correct responses (SD in brackets) for deletion of the syllabic [ʌ], of [p] followed by vowel, and of musical note*

	Illiterates	Poorer readers	Better readers
<b>Speech segment</b>			
syllabic [ʌ]	55.2 (31.7)	85.0 (9.3)	85.0 (13.8)
[p] followed by vowel	18.6 (26.9)	62.5 (21.2)	83.3 (15.0)
<b>Musical note</b>	26.4 (17.3)	26.5 (18.4)	41.7 (17.1)

*Tableau 2.2: Tâches de segmentation des sons et de musique de l'étude de Morais et collaborateurs (Morais et al., 1987b).*

Passons en revue très brièvement les autres résultats de ces mêmes participants :

**3/ segmentation progressive des phrases:** Les sujets devaient segmenter les phrases afin d'arriver aux unités minimales : phrases, mots, morphèmes, syllabes et éventuellement phonèmes. Les productions sous-syllabiques ont été très rares chez les illettrés mais pas chez les ex-illettrés.

**4/ détection de phonèmes et syllabes :** Sur une série de mots, les ex-illettrés ont été plus performants que les illettrés au niveau du phonème et aussi de la syllabe.

**5/ détection des rimes:** pas de différence entre les groupes.

**6/ rappel d'images** (noms avec ou sans rimes). La rétention à court-terme est légèrement inférieure chez les illettrés. L'effet de rime (différence entre mots avec et sans rime) a été significatif seulement chez les illettrés et les « ex-illettrés bons lecteurs ».

En conclusion, ces travaux montrent la difficulté des sujets illettrés à manipuler mentalement les petites unités du langage parlé en l'absence d'une mise en correspondance graphème-phonème apprise avec la lecture. L'étude de 1987, contrairement à celle de 1979, a trouvé des différences entre illettrés et ex-illettrés même au niveau syllabique. Toutefois les différences de groupe restaient plus importantes au niveau sous-syllabique (phonémique).

Ces résultats sont bien en accord avec la littérature du développement de l'enfant. En effet une bonne segmentation des *syllabes* est présente chez les préscolaires (Libermann 1974, cité par Morais et al., 1987). De plus, tout comme chez les illettrés, une bonne performance au niveau des rimes et des manipulations mélodiques a également été trouvée chez les préscolaires (Knaflé, 1973, cité par Morais et al., 1987).

## Résultats répliqués

Les résultats du groupe de Morais montrant l'impact de l'apprentissage de la lecture sur la conscience phonémique, ainsi que l'effet dans le sens inverse (le niveau de base de conscience phonologique en générale comme bon prédicteur de l'acquisition ultérieure de la lecture) ont été répliqués par d'autres chercheurs, chez l'adulte (Loureiro et al., 2004) mais

aussi chez l'enfant et dans d'autres systèmes d'écriture comme le chinois (Torgesen et al., 1994; Burgess et Lonigan, 1998; Lonigan et al., 2000; Shu et al., 2008; Lin et al., 2010). Par exemple, le groupe de Lucia Braga, du réseau hospitalier Sarah, basé à Brasilia (Loureiro et al., 2004) a voulu déterminer un profil *normal* des capacités de langage chez les sujets illettrés. Ceci par ce que des tests standardisés indépendants du niveau éducationnel, sont manquants et qu'il existe une vraie nécessité clinique en neurologie de connaître la performance normale chez les illettrés dans ces tâches pour évaluer ensuite des patients cérébro-lésés. Les chercheurs ont réalisé une batterie de tests de répétition orale, incluant des tests de conscience phonologique, dont les résultats sont reproduits dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3: Effect of literacy degree, with means and standard deviation, and coefficient of correlation with reading level

Task	Max	“Non-readers” (N = 68)		“Readers” (N = 29)		“Controls” (N = 50)	
		M (SD)	R (1)	M (SD)	R (2)	M (SD)	R (3)
Oral repetition of							
1. Short words	16	13.6 (1.9)	-0.04	13.4 (1.8)	-0.03		
2. Short nonwords	16	14.2 (1.8)	-0.08	14.1 (2.4)	0.28		
3. Long words	16	15.1 (1.6)	0.02	15.6 (0.7)	0.23		
4. Long nonwords	16	8.8 (2.6)	-0.05	10.7 (2.5)	0.20	13.1 (1.7)	0.39
5. Rhyme identification	8	5.3 (2.0)	0.05	6.9 (1.4)	0.00		
6. Phonological fluency		5.8 (4.5)	0.49	16.6 (7.4)	0.49		
7. Minimal pairs	20	16.1 (3.1)	0.24	17.5 (2.4)	0.24		
8. Initial phoneme deletion	12	1.8 (1.9)	0.34	5.8 (3.2)	0.34	9.3 (2.1)	0.32
9. Span for words		3.4 (0.9)	0.12	4.0 (0.8)	0.41	4.5 (0.8)	0.29
10. Span for nonwords		2.1 (0.9)	-0.11	2.6 (0.7)	0.31	3.1 (0.8)	0.26

Tableau 2.3: Résultats de l'étude de Loureiro (Loureiro et al., 2004), présentés pour chaque épreuve (M=moyenne; SD=écart-type; R= corrélation avec le niveau de lecture (reconnaissance de lettres pour les illettrés, reconnaissance des mots pour les ex-illettrés, et durée de scolarité pour les lettrés ("groupe contrôle"))).

Contrairement aux autres épreuves, la tâche de suppression du phonème initial a montré une nette différence entre les illettrés et les ex-illettrés, et également entre ces derniers et les lettrés (appelés "groupe contrôle" dans le tableau). L'épreuve de fluence phonologique, n'a pas été réalisée chez les « contrôles » mais elle a pu mettre en évidence une différence entre les illettrés et les ex-illettrés. Les résultats de ces deux tâches sont ceux qui montrent la meilleure corrélation positive avec le niveau de reconnaissance des lettres pour les illettrés, ou de reconnaissance de mots pour les ex-illettrés. Chez les « contrôles », la suppression du phonème initial a été positivement corrélée avec la durée de leur scolarité. Ces résultats suggèrent qu'il y a une augmentation du niveau de conscience phonologique à mesure que l'on apprend la correspondance graphème-phonème et que l'on pratique la lecture. Enfin, d'autres épreuves ont pu mettre en évidence des différences entre les groupes, sans toutefois

démontrer une corrélation significative avec le niveau de reconnaissance orthographique. Cela souligne la bonne valeur discriminatoire des épreuves de conscience phonologique, à la fois entre groupes et à l'intérieur des groupes.

L'absence d'une nette conscience phonémique chez les illettrés a été démontrée également dans l'étude de Paulo Ventura et collègues (Ventura et al., 2007) décrite un peu plus bas.

Plus intéressant encore sont les résultats répliqués dans les systèmes d'écriture non alphabétiques comme dans l'écriture chinoise du Mandarin (Shu et al., 2008; Lin et al., 2010; Newman et al., 2011). Dans le système Mandarin il n'existe pas de graphèmes correspondants aux phonèmes. En effet, la représentation graphique du langage peut-être syllabique ou représenter le mot entier, mais elle n'est jamais sous-syllabique, ce qui rend plus difficile l'apprentissage de la lecture en chinois par rapport au système alphabétique latin. Afin de remédier à cette absence de correspondance graphème-phonème dans le Mandarin chinois, un système artificiel, le pinyin, a été créé. Dans le pinyin les lettres alphabétiques latines représentent les sons du langage parlé en chinois. L'écriture pinyin peut également être mise en correspondance avec les caractères chinois, rendant ainsi possible l'apprentissage des mots nouveaux écrits en chinois.

Lin et collègues ont trouvé chez les préscolaires que le meilleur prédicteur de l'apprentissage futur (12 mois) de la lecture en Mandarin était leur niveau en pinyin (Lin et al., 2010). Newman et collaborateurs ont testé à leur tour des enfants chinois préscolaires et en école élémentaire (de 6-8 ans) avec l'hypothèse que même les enfants scolarisés ne devraient pas pouvoir manipuler les phonèmes (Newman et al., 2011). Ils ont contrôlé dans cette étude l'influence de l'apprentissage du pinyin. Les résultats ont montré, en accord avec d'autres (Shu et al., 2008), que les enfants préscolaires étaient capables de réaliser la tâche de délétion des syllabes mais pas celle des phonèmes. En revanche, contrairement à leurs prédictions, les enfants brièvement scolarisés en mandarin se montraient capables de réaliser même la tâche de délétion des *phonèmes*, indépendamment de leurs connaissances en pinyin. Une raison pouvant expliquer le manque d'influence du pinyin serait que la façon traditionnelle d'enseigner le pinyin consiste, selon Newman et collègues, à présenter les correspondances au niveau des syllabes et pas des phonèmes, ce qui malgré l'avantage général pour la segmentation des sons du langage, ne devrait théoriquement pas générer une conscience *phonémique*. De plus, la performance dans la tâche de délétions des phonèmes (et pas celle des syllabes) était le meilleur prédicteur du niveau de lecture des enfants. Ces

données suggèrent que l'apprentissage de la lecture, même dans les systèmes d'écriture qui ne présentent pas une correspondance directe entre graphèmes et phonèmes, génère un raffinement de la perception et de la manipulation mentale des sons du langage parlé, qui pourrait aller jusqu'au niveau le plus subtil possible: celui des phonèmes. Ainsi, l'apprentissage de la lecture semble produire même dans les systèmes non-alphabétiques une conscience phonémique.

### ***Perception catégorielle de syllabes dégradées chez les illettrés***

Dans la continuation des ses travaux, le groupe de José Morais s'est posé la question de savoir si les illettrés seraient capables de *catégoriser* les sons du langage oral (syllabes dégradées), aussi bien que des sujets ayant eu l'opportunité de développer une conscience phonologique avec la lecture (lettrés) (Serniclaes et al., 2005). Les auteurs ont testé 14 illettrés et 14 lettrés avec des stimuli formés à partir d'un procédé digital qui dégradait progressivement l'articulation des syllabes, en 6 niveaux, dont les extrêmes correspondaient à "ba" et "da", c'est-à-dire une progression de S1 (= "ba") à S6 (= "da"), avec des niveaux intermédiaires plus ou moins ambigus. Une première tâche (identification) consistait à dire si un "ba" ou un "da" était présenté. Les sujets pouvaient également rapporter un "ga" si jamais ils entendaient cela. Une deuxième tâche (discrimination) consistait à présenter aux sujets des paires identiques (ex. S1-S1) ou des paires de niveaux adjacents de dégradation (ex. S1-S2, S2-S3, etc). Pour les paires identiques (ex. S1-S1) les sujets devaient répondre "pareil", tandis que pour les paires voisines (ex. S2-S3) les sujets devraient répondre "différent".

Malgré le fait que la manipulation a été faite au niveau syllabique, l'élément discriminatoire était plutôt le phonème initial (la voyelle finale étant constante). On pourrait alors s'attendre à avoir une performance inférieure chez les illettrés, étant donné leur manque de conscience phonémique. Mais les résultats ont montré que la *perception catégorielle* chez les illettrés était comparable à celle des lecteurs. Comment interpréter alors ces données vis-à-vis des travaux antérieurs ayant démontré une absence de conscience phonémique chez les illettrés ?

Une interprétation possible serait que pour un illettré la difficulté ne se situerait pas au niveau de la *perception* des phonèmes mais à une étape ultérieure lors de la réalisation des

tâches de conscience phonémique (addition ou soustraction des phonèmes). Les auteurs soulignent le fait que certaines études suggèrent que les dyslexiques, à contrario des illettrés, présentent une difficulté de catégorisation. La difficulté de catégorisation ne serait donc pas une *conséquence* générale de la difficulté à lire, car elle n'a pas été rencontrée chez les illettrés. Cette difficulté perceptive serait donc plutôt directement liée à la dyslexie. Enfin, plus anecdotique, les illettrés ont présenté dans cette étude un biais pour répondre « da », ce qui en Portugais signifie « donne à moi », alors que « ba » ne présente aucune signification particulière, ce qui suggère une tendance à la « lexicalisation » chez les illettrés.

## ***L'alphanétisation est-elle nécessaire à la segmentation lexicale fine?***

L'apprentissage de la lecture est-il nécessaire à la fine distinction entre les mots apparentés phonologiquement?

Paulo Ventura de l'université de Lisbonne et ses collaborateurs ont manipulé la *fréquence* d'apparition des mots dans la langue et leur *densité de voisinage*, en utilisant d'une part une tâche de reconnaissance des mots dans le bruit et d'autre part une tâche d'augmentation progressive du temps de présentation des mots isolés ("gating task") (Ventura et al., 2007). Ils ont pu noter qu'il était plus facile d'identifier les mots fréquents quand ceux-ci présentaient *moins* de voisins. En revanche, pour les mots rares, il était plus facile d'identifier ceux qui présentaient *plus* de voisins. L'effet a été similaire entre lettrés, illettrés, ex-illettrés. On pourrait se poser la question de savoir si ce manque de différence entre les groupes ne pourrait pas s'expliquer par une facilitation relative de la tâche chez les illettrés (et les ex-illettrés ?) par rapport aux lettrés, en raison de leur lexique plus restreint. Autrement dit, le fait d'avoir moins de mots dans leur lexique pourrait faciliter la tâche en réduisant le nombre de mots potentiellement « distracteurs » (sachant que les mots utilisés étaient tous assez fréquents, même les « rares », afin que les illettrés puissent bien faire la tâche).

En revanche, les groupes des sujets ont présenté des performances bien différentes pour une troisième tâche, de *suppression du premier phonème* des mots. Tout en répliquant les résultats antérieurs (Morais et al., 1979, 1987a), Paulo Ventura et ses collègues ont mis en évidence une capacité supérieure des ex-illettrés (presque 80% de réussite) dans cette tâche par rapport aux illettrés (moins de 20%), alors que les résultats des lettrés étaient pratiquement parfaits. Certes, l'évaluation de la performance du sujet par l'examineur reste subjective et peut-être influencée

par des a priori concernant le groupe d'appartenance des sujets, mais une telle différence semble quand même réelle et liée aux 3 années d'alphabétisation à l'âge adulte qui distinguaient les ex-illetrés des illetrés. Les auteurs concluent que l'alphabétisation ne serait pas nécessaire à la segmentation fine des représentations lexicales, mais elle amplifierait nettement la conscience phonologique.

Faisons un bref résumé. Les évidences de la littérature suggèrent que l'alphabétisation est une condition nécessaire à l'émergence d'une *conscience phonémique* ou en tous cas d'une *nette* conscience phonémique. En revanche, sur certaines épreuves de conscience phonologique au niveau de la *syllabe* (pas du phonème), les illetrés peuvent avoir des niveaux comparables à ceux d'ex-illetrés ou même des lettrés (Morais et al., 1979; Serniclaes et al., 2005). Néanmoins, pour l'épreuve de perception catégorielle des syllabes dont l'élément changeant est le premier phonème, les illetrés présentent des performances égales à celles des lettrés. Ce résultat permet d'évoquer une hypothèse encore plus précise des difficultés des illetrés avec les phonèmes, lorsqu'on prend également en compte les épreuves auxquelles ils échouent systématiquement, à savoir, l'addition ou la soustraction des phonèmes. La difficulté des illetrés ne se situerait *pas au niveau perceptif* mais à une étape postérieure : soit ils seraient *incapables de maintenir une représentation* précise des phonèmes en mémoire de travail (car ils ne peuvent pas se faire aider par la représentation du graphème correspondant), soit ils échoueraient plutôt à l'étape finale de *production*, une fois qu'ils doivent *répéter* les mots/pseudo-mots avec l'addition ou la soustraction demandées (voir en revanche (Alario et al., 2007b) pour l'absence d'influence orthographique sur la production du langage chez les lettrés).

De plus, l'alphabétisation, même tardive, ne serait peut-être pas nécessaire à la discrimination lexique, mais seulement à une plus grande conscience phonologique (Ventura et al., 2007). Même dans les systèmes d'écriture non alphabétiques comme dans le Chinois, l'apprentissage de la lecture semble augmenter la conscience des sons du langage parlé, peut-être même au niveau minimal des phonèmes (Newman et al., 2011). Dans le sens inverse, l'apprentissage d'un système alphabétique auxiliaire (le pinyin) au système logographique chinois (Mandarin), facilite le futur apprentissage de la lecture en Mandarin (Shu et al., 2008; Lin et al., 2010).

En outre, les bases cérébrales du traitement de chacune des unités du langage (phonème, syllabe et niveau supra-syllabique) commencent à être mis en évidence par des nouveaux méthodes (Peeva et al., 2010).

Enfin, d'autres chercheurs se sont intéressé à vérifier « sur le terrain » si une sensibilisation phonologique plus importante pourrait augmenter l'efficacité des programmes éducatifs des adultes. Royer et collègues (Royer et al., 2004) ont montré que cela est effectivement le cas, dans une expérience réalisée au Burkina Faso, qui a comparé la méthode traditionnelle à celle où l'accent est mis sur la sensibilisation phonologique. D'autres recherches mieux contrôlées en laboratoire ont montré également que le développement de la conscience phonologique facilite l'alphabétisation des enfants (Simmons et al., 2007).

### ***La latéralisation du langage à l'hémisphère gauche***

La latéralisation hémisphérique du langage est une question qui intrigue les chercheurs depuis longtemps. Il est bien établi que chez la grande majorité des êtres humains le langage domine dans l'hémisphère gauche (environ 90% des sujets). Cela reste vrai même chez les gauchers qui ont une dominance hémisphérique droite pour la manualité (75%). D'où vient cette latéralisation du langage à gauche ? Est-elle simplement le résultat des asymétries anatomiques, notamment des lobes temporaux ?

Nous allons voir dans le chapitre 3, que l'apprentissage de la lecture fait émerger une spécialisation pour la détection de l'orthographe dans le cortex occipito-temporal, également dans l'hémisphère gauche. Cette région est connue comme la zone de la forme visuelle des mots (ou Visual Word Form Area (VWFA) en anglais). Cette latéralisation à gauche de la VWFA serait-elle directement influencée par la latéralisation du langage ? La VWFA serait-elle « attirée » également à gauche pour des raisons intrinsèques à cet hémisphère, de façon indépendante de la latéralisation du langage ?

### ***L'impact des lésions cérébrales sur le langage parlé des lettrés et illettrés***

L'apprentissage de la lecture, en spécialisant des régions cérébrales pour l'orthographe et peut-être en raffinant les autres représentations du langage parlé (phonologique et lexico-

sémantique) pourrait-il avoir un impact dans la présentation clinique des patients ayant une lésion cérébrale?

Pour répondre à cette question des chercheurs et médecins ont comparé le taux d'aphasie (atteinte du langage parlé) chez les lettrés et illettrés lorsque les lésions surviennent à l'hémisphère gauche par rapport à l'hémisphère droit. Les premières observations ont suggéré que les illettrés devenaient rarement aphasiques, ou que leurs aphasies étaient atténuées ou atypiques dans ses manifestations cliniques ou en rapport avec la lésion (Weber, 1962; Critchley 1956; Eisenson, 1964 et Cameron, 1971, cités par Damasio et al., 1976).

Antonio Damasio, rattaché à l'époque à la faculté de médecine de Lisbonne, avec ses collègues Castro-Caldas et Jorge Grosso (Damasio et al., 1976) a souhaité revoir la question de façon moins anecdotique et plus systématique. Pour cela, ils ont réalisé une étude avec près de 250 patients victimes de lésion cérébrale focale, dont 38 illettrés. Parmi ces derniers, 24 avaient une lésion à gauche et 14 à droite. Les chercheurs ont évalué les patients avec une série de mesures standards (fluence verbale, inadéquation lexicale, structure syntaxique, compréhension verbale, répétition de mots, nombres et phrases, nomination d'objets, etc.).

En revanche, ils ont utilisé seulement une de ces mesures, le Token test (en version réduite et adaptée au Portugais), pour comparer les lettrés aux illettrés, en justifiant qu'il s'agissait d'une mesure particulièrement sensible aux symptômes d'aphasie. Des 38 patients cérébro-lésés illettrés, 21 avaient développé une aphasie et tous, sauf un, étaient victimes de lésions à l'hémisphère gauche. Le seul sujet avec une lésion à droite était par ailleurs gaucher. Les chercheurs ont donc comparé les 20 patients aphasiques *illettrés* avec 20 patients aphasiques *lettres*, appariés par âge, sexe, type d'aphasie et localisation de la lésion. Les résultats montrent une grande similarité entre les deux groupes de patients, en ce qui concerne le pourcentage du type d'aphasie et le degré de gravité. De plus, la proportion de patients cérébro-lésés (les deux hémisphères confondus) qui deviennent aphasiques reste équivalente pour les deux groupes: 21/38 (= 55.2%) pour les illettrés et 114/209 (= 54.2%) chez les lettrés.

Donc, pour Damasio et ses collègues, il n'existe pas de différence entre lettrés et illettrés pour la latéralisation du langage, compte tenu de la proportion d'apparition d'aphasie et du degré de gravité, à la suite d'une lésion cérébrale.

## La question revisitée

Quelques années plus tard, un autre groupe de chercheurs composé d'André Roch Lecours, rattaché à un centre de recherche hospitalier de Montréal et de ses collaborateurs internationaux (Jacques Mehler, Maria Parente et autres), a voulu revisiter la question avec une large étude transculturelle et prospective, en utilisant un matériel plus adapté aux illettrés que dans l'étude de Damasio (le Token test dépend de connaissances scolaires, par exemple sur les formes géométriques).

### La normalisation des tests chez le sujet sain lettré et illettré

Dans un premier article d'une série de trois, les auteurs décrivent la normalisation de cette batterie de tests d'aphasie destinés à être utilisés ensuite sur les patients (Lecours et al., 1987b). L'équipe de chercheurs a testé 100 sujets neurologiquement sains au Brésil (Recife, Salvador, Rio de Janeiro, São Paulo, Curitiba et Brasília) et au Portugal (Lisbonne), dont 57 "totalement illettrés" selon les auteurs, c'est-à-dire n'ayant jamais eu l'opportunité d'aller à l'école pendant l'enfance ni à l'âge adulte, étant incapables de lire ou d'écrire. Tous les participants étaient monolingues et droitiers. L'âge variait entre 40 et 83 ans avec une moyenne pour chaque groupe de 60 ans environs. Parmi les lettrés, le niveau scolaire était variable, allant de 4 à 15 années de scolarité.

Dans un premier test les sujets devaient simplement *pointer les objets* demandés oralement par l'examineur, sur un ensemble de dessins présentés en noir et blanc. Dans une deuxième tâche, ils devaient pointer l'image qui correspondait à la *phrase* dite par l'examineur. Elle pouvait être *simple*, comme par exemple: pointez "la fille marche" (voir figure 2.1).

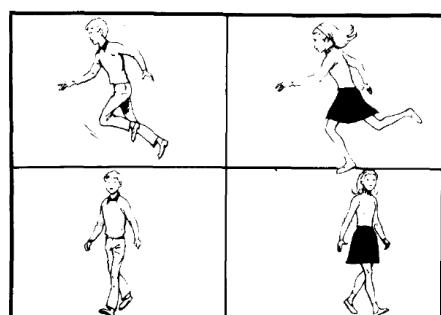


FIG. 2. "Simple sentence comprehension" subtest; stimulus No. 2 (the target is *A menina anda*; the girl walks).

*Figure 2.1 : Exemple de tâche de pointage à partir des phrases simples dans l'étude de Lecours (Lecours et al., 1987b)*

Les phrases pouvaient être aussi un peu plus *complexes*. Par exemple, pointez "le cheval entraîne le garçon" (voir figure 2.2).

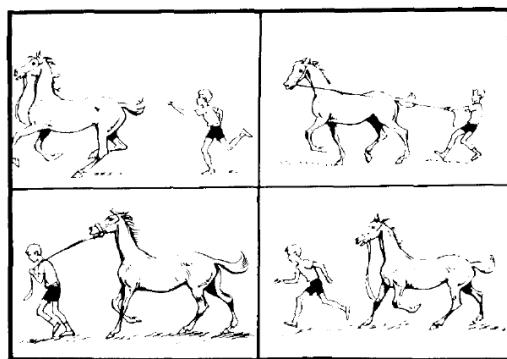
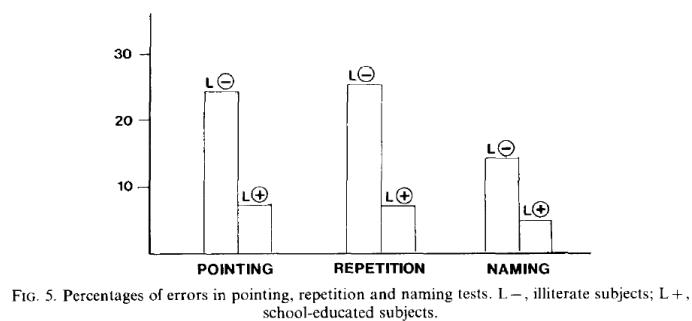


FIG. 3. "Complex sentence comprehension" subtest; stimulus No. 1 (the target is *O cavalo puxa o menino*; the horse pulls the boy).

*Figure 2.2 : Exemple de tâche de pointage de l'image correspondant aux phrases plus complexes dans l'étude de Lecours (Lecours et al., 1987b)*

De plus des tests de pointage, les chercheurs ont soumis les sujets des tests de *répétition des mots*. Une autre épreuve consistait à *nommer* les dessins représentant des images quotidiennes (ex. peigne, cloche, oreille, etc.). Les résultats sont montrés dans la figure 2.3.:



*Figure 2.3 : Résultats pour chaque épreuve dans l'étude de Lecours, pour les lettrés (L+) et illettrés (L-), en pourcentage d'erreurs (Lecours et al., 1987b). Pour les épreuves de pointage, les corpus de phrases simples et complexes ont été fusionnés.*

Au vu des résultats, on pourrait se demander tout d'abord pourquoi même les lettrés ont eu un pourcentage non négligeable d'erreurs pour des tests relativement simples. Les auteurs justifient ce résultat par *l'ambigüité de certains dessins* : l'oreille était prise pour un canard par certains sujets et le chat était parfois pris pour une "onça" (espèce de jaguar brésilien). Ils ont évoqué encore *l'âge* un peu avancé des sujets qui, comme d'autres chercheurs l'avaient déjà montré, pourrait entraîner une augmentation du taux d'erreurs dans les batteries des tests neuropsychologiques.

Concernant la différence entre les groupes, les auteurs considèrent que la différence de *niveau de vocabulaire* ainsi qu'une certaine *imprécision du langage* pourraient expliquer des résultats plus faibles chez les illettrés. Par exemple les illettrés pouvaient ne pas faire la distinction entre des 'énoncés tels que "la fille court" et "la fille marche".

### **Les tests de Lecours et collaborateurs chez les patients lettrés et illettrés**

Dans le deuxième article (Lecours et al., 1987a), Lecours et ses collèges présentent les résultats obtenus sur 169 *patients neurologiques* victimes d'AVC (Accident Vasculaire Cérébral), soit lettrés, soit illettrés, et leurs respectifs groupes contrôle ayant des sujets de même âge, niveau de scolarité et pays d'origine (Brésil ou Portugal). Les auteurs présentent dans cet article seulement les résultats des tâches de correspondance phrase-figure. Le tableau 2.4, indique le pourcentage d'erreur pour les épreuves de pointage de figures selon que les phrases sont simples ou complexes:

**TABLE 2  
ERROR SCORES FOR THE MI- $\alpha$  SENTENCE-PICTURE MATCHING SUBTEST (PERCENTAGES OF INADEQUATE RESPONSES PER GROUP)**

		SIMP SENT	COMP SENT	Total
ILLIT	Controls	23.4	53.8	38.6
	Left strokes	40.3	77.5	58.9
	Right strokes	41.0	40.2	40.6
LIT	Controls	4.7	19.4	12.1
	Left strokes	21.1	50.3	35.7
	Right strokes	26.7	22.2	24.5

*Note.* SIMP SENT = "simple sentence" subtask (three items); COMP SENT = "complex sentence" subtask (three items); Total = combined error scores for the two subtasks (six items).

*Tableau 2.4: Taux d'erreurs de l'épreuve de pointage chez les patients lettrés et illettrés ainsi que leurs contrôles dans l'étude de Lecours (Lecours et al., 1987a)*

Les analyses statistiques ont montré que:

- Les *illettrés* victimes d'AVC au niveau de l'hémisphère *gauche* étaient significativement moins bons par rapport à leurs contrôles pour les deux tâches;
- En revanche, les *lettrés* victimes d'AVC gauche, présentaient seulement une différence significative en ce qui concerne la tâche de phrases complexes ;
- Les *illettrés* avec un AVC *droit*, ont été significativement moins performants que leurs contrôles pour la tâche simple. Pour les phrases complexes, la moyenne des patients illettrés était même meilleure que celle des contrôles ! On pourrait peut-être évoquer un haut niveau de bruit dans les mesures pour expliquer cela;
- Les *lettrés* avec un AVC *droit* n'ont pas montré de différence significative par rapport aux contrôles pour les phrases simples ou complexes.

Le troisième article de la série montre les résultats des tâches de dénomination d'images, de répétition de mots, de correspondances mot-image et phrase-image (Lecours et al., 1988). Les performances des patients cérébro-lésés dans l'hémisphère *gauche*, à la fois lettrés et illettrés, ont été inférieures à celle de leurs groupes contrôles respectifs dans toutes ces tâches de langage. Pour les lésions à droite, seule la tâche de dénomination a montré une différence significative entre les illettrés malades et les illettrés sans lésion, ce qui n'a pas été le cas pour les groupes des lettrés. Toutes les autres tâches n'ont pas mis en évidence de différences de performance entre les patients souffrant d'une lésion droite et les contrôles, que ce soit pour les lettrés ou les illettrés. Les auteurs concluent qu'un AVC droit serait plus aphasiogène chez les illettrés. Le langage serait ainsi plus bilatéral en absence d'alphanétisation/scolarité. Ils nuancent néanmoins leurs conclusions en évoquant le fait que l'hémisphère gauche reste dominant pour le langage même chez les illettrés. Le manque de robustesse dans leurs résultats incite toutefois à une certaine prudence vis-à-vis de ces conclusions.

### ***Etudes de neuroimagerie fonctionnelle chez les illettrés sans lésion***

Une autre approche pour répondre à cette question d'une éventuelle influence de l'alphanétisation sur la latéralisation du langage, a pu émerger avec les avancées

technologiques de la neuroimagerie fonctionnelle non-invasive, permettant ainsi des investigations *in vivo* chez les sujets sains, lettrés et illettrés.

## **Le cerveau illetré s'active différemment pour les pseudo-mots**

Dans un travail princeps, Alexandre Castro-Caldas, de l'université de Lisbonne, et ses collègues ont réalisé une importante étude sur l'imagerie cérébrale fonctionnelle des illettrés, à partir d'une collaboration entre le Portugal et la Suède. L'activité des régions cérébrales a été mesuré lors de l'évaluation d'une tache de langage à l'aide d'une caméra à positions (Positon Emission Tomography [PET] en anglais) sur 6 sujets illettrés et 6 sujets lettrés. Tous les sujets étaient de sexe féminin et la grande majorité avait entre 60 et 70 ans. Malgré la petitesse de l'effectif, cette étude a pu compter sur un groupe de sujets contrôle de bonne qualité, car issus du même milieu socio-culturel (parfois même des sœurs des illettrés). Il faut noter que vers les années 40 ou 50, il était courant au Portugal, dans les familles le plus défavorisées, de ne pas envoyer la fille ainée à l'école afin qu'elle s'occupe des autres enfants à la maison. Par conséquent les chercheurs ont pu avoir deux groupes de sujets véritablement comparables du point de vue socioculturel, mais différents au niveau de la scolarité. Les participantes ont pris l'avion du Portugal à Stockholm où les examens ont été réalisés. La tâche était simple : elles devaient répéter immédiatement et le plus parfaitement possible les mots et pseudo-mots qu'elles allaient écouter. Les stimuli consistaient en 6 listes de 20 mots fréquents. Des pseudo-mots, de même taille et comportant les mêmes voyelles, différents des vrais mots par leurs consonnes, ont été créés.

Au niveau comportemental, une fois à l'intérieur du scanner, les sujets illettrés ont présenté une importante difficulté à répéter les pseudo-mots (40/120), mais pas les vrais mots (110/120). Les lettrés n'ont présenté de difficultés pour aucun des deux types de stimuli. Cette évaluation a pu être fortement biaisée par la subjectivité de l'examineur devant trancher de façon binaire quant à la bonne répétition des stimuli, notamment des pseudo-mots. Dans ce cas, il serait souhaitable d'avoir un juge "aveugle" au groupe de sujets, pour ne pas être influencé par des *a priori* (« les illettrés sont moins performants »). L'idéal aurait été d'avoir également deux ou trois juges indépendants afin de vérifier la corrélation inter-juges.

Au niveau cérébral, lorsque les auteurs ont réalisé le contraste (mots > pseudo-mots), les résultats pour les groupes de lettrés (partie A sur la figure 2.4) et d'illettrés (partie B) sont similaires.

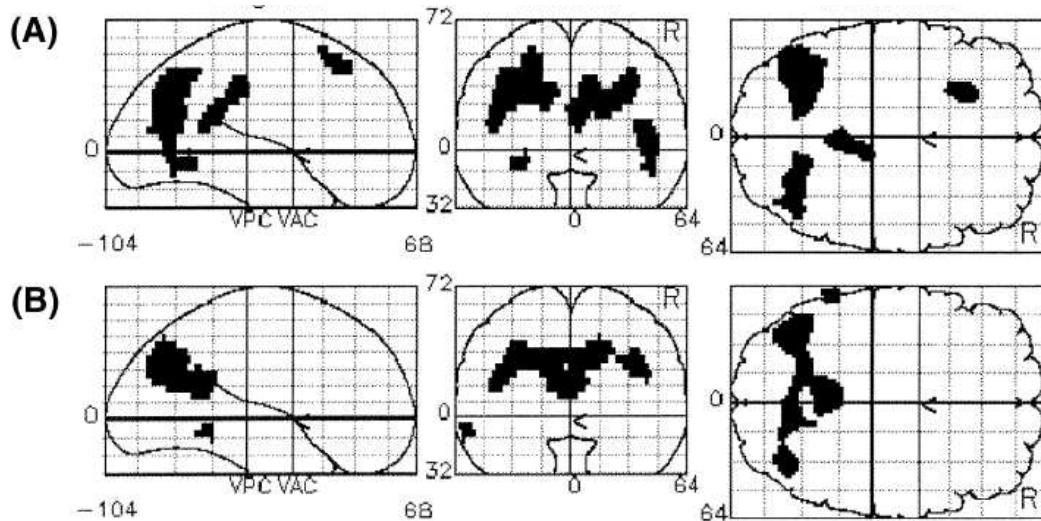


Figure 2.4 : L'activation cérébrale pour le contraste [mots > pseudo-mots] chez les lettrés (A) et illettrés (B) dans l'étude de Castro-Caldas (Castro-Caldas et al., 1998).

Lorsqu'ils ont essayé d'isoler ce que les lettrés ont de plus que les illettrés, en faisant la soustraction des deux images précédentes, les chercheurs ont mis en évidence une partie de la région pariétale postérieure gauche. Ensuite, en faisant le contraste inverse, c'est-à-dire, [pseudo-mots > mots], le groupe lettré a présenté une activation dans un vaste réseau qui comprenait des zones du langage, tandis que les illettrés ne montraient pas de différences dans le traitement des pseudo-mots par rapport aux vrais mots, à part une petite activation préfrontale, qui témoigne peut-être d'une augmentation de l'effort cognitif pour répéter les pseudo-mots.

En conclusion, dans une tâche de répétition des *mots*, les illettrés ont sollicité des réseaux neuronaux proches de ceux des lettrés, à l'exception de la région pariétale postérieure gauche. Pour la répétition des *pseudo-mots* les illettrés ont activé les mêmes régions que pour les vrais mots et les résultats comportementaux semblent montrer leur difficulté à répéter les pseudo-mots. Serait-ce une démonstration objective de la tendance des illettrés à lexicaliser les pseudo-mots ? Les lettrés en revanche, activent beaucoup plus fortement un vaste réseau du langage pour les pseudo-mots que pour les mots et arrivent à faire correctement la tâche.

## **Le lien sémantique plus facile que le lien phonologique chez les illettrés**

Dans un travail postérieur du même groupe de chercheurs, sept illettrés de sexe féminin, toujours dans la tranche d'âge 55-70 ans, appariés à huit lettrées, ont effectué une tâche auditive de mémoire pendant l'enregistrement PET tout en manipulant le lien (sémantique ou phonologique) entre les paires de mots (Petersson et al., 1999). Des listes de paires de mots sémantiquement liés et d'autres listes de mots phonologiquement liés ont été présentées aux sujets. Après l'encodage, un premier rappel a été réalisé: le premier mot de la paire était présenté et le sujet devait se souvenir du deuxième, ou alors dire "passo" (= le suivant). Ensuite, les chercheurs présentaient une nouvelle liste de mots. Puis, une nouvelle étape d'encodage (avec les mêmes listes qu'à l'étape précédente) et une dernière étape de rappel étaient réalisées. L'enregistrement de l'activité cérébrale commençait seulement lors de ces deux dernières étapes.

Les auteurs ont considéré que les performances pendant le premier rappel seraient un index de *l'encodage*, tandis que les performances du deuxième rappel (pendant le scanner) seraient un index du *rappel*. Ils ont nommé les performances pour le premier rappel : SE pour Semantic Encoding et PE pour Phonological Encoding, respectivement pour les listes sémantiques et phonologiques. Pour le deuxième rappel: SR pour Semantic Retrieval et PR pour Phonological Retrieval.

Chez les illettrés, en accord avec une étude antérieure (Reis, 1997, cité en Petersson, 1999), le rappel a été meilleur pour les paires sémantiquement liées que pour les paires phonologiquement liées (voir tableau 2.5).

Mean Cued-Recall Performances in the Illiterate Subjects during the Different Retrieval Periods (See Fig. 1 for a Schematic Overview of the Experimental Paradigm)

List type	Cued recall after encoding scans	Cued recall before retrieval scans	Cued recall during retrieval scanning
Semantic	$6.4 \pm 1.1$	$6.8 \pm 1.2$	$9.2 \pm 1.3$
Phonological	$2.3 \pm 0.9$	$3.0 \pm 1.7$	$5.1 \pm 2.1$
Pvalue	0.02	0.01	0.01

Tableau 2.5 : Performances chez les illettrés lors des tâches de mémoire selon le lien sémantique ou phonologique entre les mots, d'après les travaux de (Petersson et al., 1999).

Un problème de nomenclature rend l'étude de Petersson un peu confuse. Les auteurs définissent SE et PE comme les performances exclusivement recueillies lors du rappel après le scanner *d'encodage* (SE = Semantic Encoding; PE = Phonological Encoding). Ensuite, ils utilisent la même terminologie SE et PE pour les performances *pré scanner de rappel* (donc un quart d'heure après l'encodage) et encore pire *pendant le scanner de rappel* (censé donc refléter le *rappel* et pas l'*encodage*) ! La terminologie cohérente dans ce cas serait SR pour Semantic Retrieval et PR pour Phonological Retrieval (voir tableau 2.6).

Comparing the Mean Differences in Semantic and Phonological Cued-Recall Performances between the Literate and the Illiterate Group; That Is,  $[SE - PE]_{literate} - [SE - PE]_{illiterate}$

Group	SE – PE after encoding scans	SE – PE before retrieval scans	SE – PE during retrieval scanning
Illiterate	$4.1 \pm 1.3$	$3.8 \pm 1.6$	$4.0 \pm 2.1$
Literate	$1.7 \pm 1.7$	$2.2 \pm 1.7$	$1.4 \pm 1.2$
P value	0.01	0.08	0.01

Tableaux 2.6 : Comparaison entre les performances des lettrés et des illettrés sur les tâches de mémoire, selon le lien sémantique ou phonologique entre les mots, d'après les travaux de (Petersson et al., 1999).

Au niveau cérébral, les auteurs ont trouvé une corrélation positive entre le cortex frontal inférieur gauche et le cortex temporal médial bilatérale pour le "SE" et le "PE", tous sujets confondus. En résumé, les illettrés semblent éprouver plus de difficulté que les lettrés pour créer une association entre deux mots *phonologiquement* liés, comparativement à une paire de mots *sémantiquement* liés. Les réseaux frontal inférieur gauche et temporaux médial bilatéral semblent participer à ces associations (sémantiques et phonologiques) chez tous les sujets, indépendamment du niveau de lettrisme.

## **Les réponses aux sons du langage moins latéralisées chez les illettrés ?**

Le groupe de Castro-Caldas a également tenté de préciser la latéralisation du langage chez les illettrés par une étude basée sur une caméra à positons (PET) (Petersson et al., 2007). La tâche consistait à écouter silencieusement les mots et à les mémoriser. Les chercheurs ont sélectionné deux régions d'intérêt: les cortex auditifs primaires et les cortex pariétaux inférieurs. Ils ont trouvé une latéralisation des activations à droite plus importante pour le groupe des illettrés sur le cortex pariétale inférieur. Par contre, le cortex auditif primaire n'a pas montré de différences de latéralisation entre les groupes. Ils ont également effectué une analyse anatomique avec la méthode VBM (Voxel Based Morphometry) qui a montré une épaisseur plus importante du corps calleux sur le tiers postérieur chez les lettrés. Du fait qu'aucune différence n'ait été trouvée pour la matière grise correspondante, les auteurs ont proposé que l'apprentissage de la lecture pouvait avoir un impact plus important sur la connectivité du cerveau que sur la matière grise.

## **Quand on lit pour la première fois son propre dialecte**

Jubin Abetalemi des universités de San Raffaele à Milan en Italie et de Postdam en Allemagne ainsi que ses collaborateurs, ont profité de la situation particulière des dialectes, où la langue est utilisée sous forme orale et non écrite, pour essayer d'en tirer quelques leçons (Abutalebi et al., 2007). Dans une ville du Tyrol, le dialecte dérivé de l'allemand est exclusivement oral et reste la principale langue parlée (l'Allemand étant la deuxième). Les sujets peuvent donc être considérés, dans une certaine mesure, "illettrés à leur dialecte". L'idée des chercheurs a été d'étudier les réponses cérébrales à la présentation visuelle des mots du dialecte. Plus précisément, ils ont voulu voir le cerveau établir ('in vivo') le lien entre l'orthographe (inédite à leurs yeux) d'une part et d'autre part la phonologie et la sémantique (les deux dernières étant solidement acquises depuis l'enfance).

Pour ce faire, 60 mots du dialecte, très fréquemment utilisés, ont été choisis au terme d'un processus de sélection par un grand nombre de lycéens, qui les ont jugés comme "très fréquents". Les chercheurs précisent qu'ils ont pris soin d'éviter les mots du dialecte présentant une grande similarité avec l'allemand. Le même nombre de *pseudo-mots* a été créé en changeant les deux derniers graphèmes des mots, tout en conservant le même nombre de

syllabes et de clusters de consonnes. Les pseudo-mots représentaient dans ce cas un contrôle intéressant car ils possédaient la même structure orthographique que les mots et permettait également l'accès à sa phonologie, sans pour autant permettre l'accès au sens.

Un deuxième contrôle a été fait avec des mots en allemand, dont l'orthographe ainsi que la phonologie et la sémantique étaient bien connus des sujets. Malheureusement aucune mention n'est faite par rapport à la *régularité* des mots choisis en allemand, ce qui pourrait avoir influencé l'utilisation d'une des deux voies de la lecture: la voie directe (= voie lexicale) pour les mots irréguliers et la voie indirecte (= voie phonologique) pour le décodage des mots réguliers. Le paradigme était composé de mini-blocs de 6 items chacun, chaque mini-bloc appartenant à une des 3 catégories: mots du dialecte, pseudo-mots du dialecte et mots en allemand.

Une première étude comportementale a été faite avec 21 natifs de la ville de Tyrol, toutes des femmes, âgées de 24 à 49 ans et dotées d'un bon niveau scolaire (13 ans minimum). Le groupe contrôle était composé de 8 allemandes d'âge et de niveau scolaire comparables. La consigne était de lire avec le plus grand soin et le plus rapidement possible les stimuli présentés au centre de l'écran. Comme réponse, ils ont mesuré le "temps de réaction"(VOT pour Voice Onset Time), indexé par le début de la lecture de chaque stimulus, lequel a été enregistré grâce à un microphone. Les résultats comportementaux sont présentés dans le graphique de la figure 2.5.

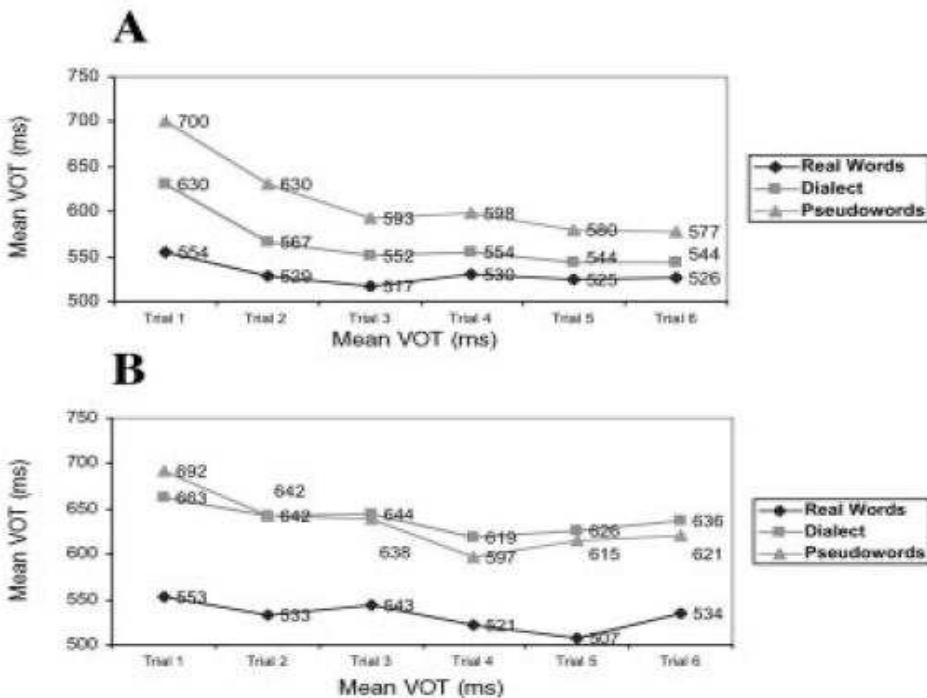
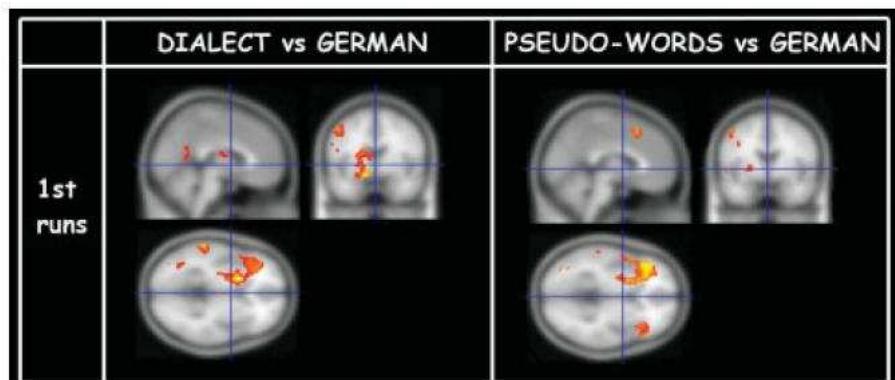


Figure 2.5 : Temps de lecture dans l'étude d'Abutalebi (Abutalebi et al., 2007). Lecture des mots allemands (*Real Words*), mots écrits du dialecte (*Dialect*) et pseudo-mots (*Pseudowords*), par les sujets du Tyrol (en A) et des contrôles allemands (en B).

Pour le groupe du Tyrol (en A) on note un avantage pour lire les mots du dialecte par rapport aux pseudo-mots. Le fait de connaître la phonologie et d'avoir également une représentation lexico-sémantique des mots du dialecte facilite donc clairement leur lecture (voir aussi l'étude avec pseudohomophones de (Bürki et al., in press)). En revanche, la connaissance additionnelle de l'orthographe (pour les mots en allemand) confère un avantage supplémentaire. Par contre, les sujets allemands (en B) ne montrent pas cet avantage dans la reconnaissance des mots du dialecte par rapport aux pseudo-mots.

Afin de vérifier les modifications cérébrales pendant la tâche, les chercheurs ont recruté 12 autres femmes natives du Tyrol, naïves par rapport à la tâche et plus jeunes (entre 22 et 29ans). Une importante faiblesse de cette étude en IRMf a été de ne pas avoir eu de groupe contrôle. Le paradigme était équivalent à celui de l'étude comportementale, mais la consigne était ici de lire de façon silencieuse, probablement pour éviter des artefacts liés aux mouvements de tête dus à l'articulation lors de l'acquisition des images IRMf. Les auteurs ont mis en valeur le résultat suivant : les réponses cérébrales lors de la lecture du Dialecte versus

celle de l'Allemand (voir figure 2.6, cadran à gauche) ont été détectables dans la partie antérieure de l'hippocampe gauche.



*Figure 2.6 : Activation cérébrale correspondant aux contrastes [dialect>mots allemandes] dans le cadran à gauche et [pseudo-mots>mots allemandes] à droite, d'après l'étude d'Abutalebi (Abutalebi et al., 2007).*

Cette activation de l'hippocampe n'a pas eu lieu pour le contraste entre Pseudo-mots et l'Allemand. Pour expliquer ces résultats, les auteurs ont évoqué l'hypothèse d'une participation de l'hippocampe dans la formation de nouvelles traces de mémoire, en l'occurrence, l'association entre, d'une part, l'orthographe du dialecte (inconnu jusque là) et, d'autre part, la phonologie et la sémantique.

Enfin, une petite note de prudence doit être apportée, suite à une discussion personnelle avec une amie originaire du Tyrol : elle m'a informé que les jeunes de cette région utilisent leurs téléphones portables pour échanger des *textos* (SMS) écrits dans le dialecte ! L'article datant de 2007 et les participants étant jeunes, il est ainsi probable qu'ils n'étaient pas totalement vierges de toute connaissance quant à l'orthographe du dialecte.

## Les illettrés chinois

A Hong-Kong, 12 sujets lettrés versus 12 illettrés, tous chinois monolingue (cantonais), âgés de 60 à 75 ans ont participé à une recherche en IRMf dont la tâche était de "lire silencieusement" 30 caractères chinois [figure 2.7; partie (A)] et 30 symboles de la route en [partie (B)] (Li et al., 2006).



Figure 2.7 : Symboles utilisés dans l'étude de Li et collaborateurs (Li et al., 2006)

Malheureusement la tâche ne semble pas adaptée aux illettrés, qui par définition ne peuvent pas lire, ce qui se traduit par une importante différence d'implication dans la réalisation de la tâche, qui devient pour les illettrés une simple observation passive, contrairement au cas du groupe lettré. Les auteurs ont mis en avant une différence du pattern d'activation entre les deux groupes pendant la lecture de *caractères chinois*: activation frontale inférieure et frontal moyenne à gauche plus importante pour les lettrés d'une part, et d'autre part une activation du STG (gyrus temporal supérieur) bilatéralement plus importantes pour les illettrés. Pendant la "lecture" des *signes routiers*, les lettrés ont activé plus que les illettrés les régions frontales inférieures/moyennes bilatéralement. Il faut donc attendre des travaux mieux contrôlés pour connaître les différences entre lettrés et illettrés chinois et ainsi avoir une meilleure idée de l'universalité de l'impact cérébral de l'alphabétisation.

## **Conclusion:**

Dans ce deuxième chapitre nous avons vu que les adultes n'ayant pas appris la correspondance graphème-phonème (i.e., les illettrés) présentent des performances plus faibles que les lettrés dans les tâches de manipulation mentale des sons du langage parlé (conscience phonologique). Cette difficulté apparaît parfois au niveau de la syllabe, mais elle est surtout mise en évidence au niveau élémentaire du *phonème*, dans des tâches d'addition ou de soustraction de phonèmes. On parle alors d'un manque de « conscience phonémique » chez les illettrés (Morais et al., 1979, 1987a; Shu et al., 2008; Lin et al., 2010; Newman et al., 2011). D'ailleurs, le niveau de base de conscience phonologique (dans un sens plus large) chez les préscolaires est le meilleur prédicteur de l'apprentissage futur de la lecture, même en chinois (Shu et al., 2008; Lin et al., 2010; Newman et al., 2011). De plus, en mettant l'accent sur le développement de la conscience phonologique, l'alphabétisation devient plus facile (Royer et al., 2004; Simmons et al., 2007).

Nous avons exposé la controverse sur l'éventuel impact de l'éducation sur la latéralisation du langage à l'hémisphère gauche. Les travaux ont consisté à mettre en rapport la localisation des lésions cérébrales (l'hémisphère atteint) et l'émergence ou non d'aphasie chez les lettrés et les illettrés. Dans l'étude de Antonio Damasio (Damasio et al., 1976) les illettrés semblent présenter une latéralisation du langage équivalente aux lettrés, alors que dans ceux de André-Roch Lecours (Lecours et al., 1987b, 1987a, 1988) des lésions dans l'hémisphère droit seraient plus aphasiogènes chez les illettrés que chez les lettrés, suggérant indirectement une moindre latéralisation du langage à gauche chez les illettrés.

Le travail du groupe de Castro-Caldas (Castro-Caldas et al., 1998) a montré une réduction particulière des activations cérébrales chez les illettrés lors de la répétition des pseudo-mots mais pas vraiment pour les mots. Abutalebi (Abutalebi et al., 2007) a montré que lorsqu'on lit pour la première fois (ou presque) son propre dialecte, on obtient un net avantage dans la fluence de lecture en comparaison avec des pseudo-mots. Ce résultat s'explique probablement par la présence de représentations phonologiques et lexico-sémantiques chez les sujets utilisant le dialecte dans leur quotidien, malgré le manque de familiarité avec l'orthographe.

## **Chapitre 3: Impact de l'alphabétisation sur la perception visuelle et son réseau cérébral**

### **Introduction:**

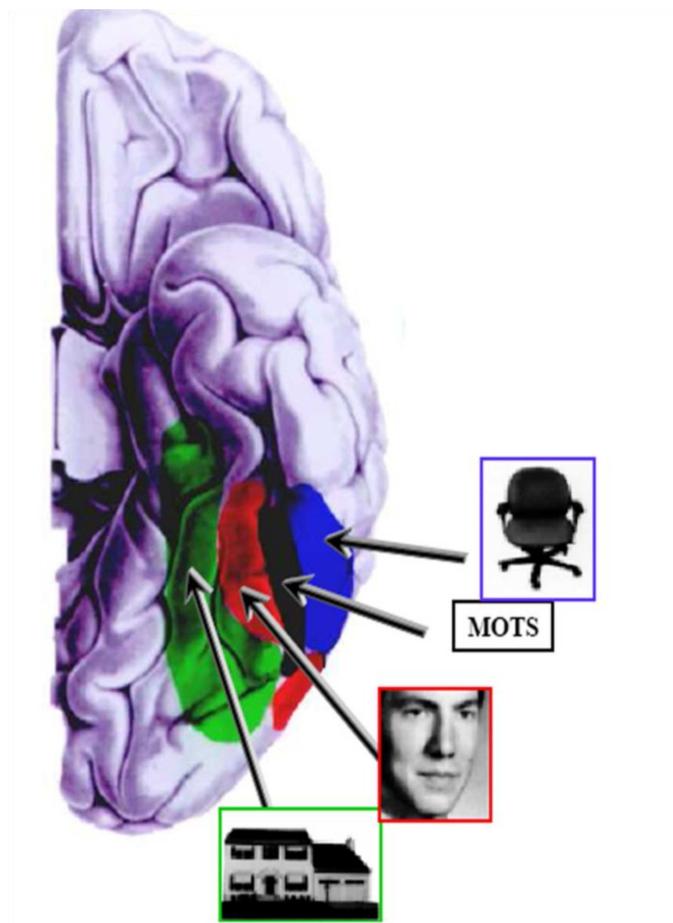
Lorsque nous lisons, nous sommes amenés à détecter très rapidement un grand nombre de symboles visuels arbitraires: les lettres. Dans quelle mesure cette expertise visuelle module le système visuel faisant émerger des sites qui répondent aux stimuli orthographiques ? Est-ce que la lecture augmente les réponses cérébrales de façon généralisée pour toutes les catégories de stimuli visuels ? Est-ce que l'impact de la lecture serait restreint aux régions de traitement de haut niveau des images ? Ou serait-il déjà notable dans le cortex qui traite les aspects visuels de plus bas niveau ? Cette pratique culturelle pourrait-elle même influencer des mécanismes neuronaux du système visuel humain qui se sont bien établis au cours de l'évolution?

### ***L'émergence d'une région spécialisé pour l'orthographe***

Chez les lecteurs, une région du cortex occipito-temporal gauche répond aux stimuli orthographiques (lettres, mots, pseudo-mots). Cette zone restreinte a été appelée la région de la forme visuelle des mots (en anglais Visual Word Form Area-[VWFA] (Cohen et al., 2000)). Elle est active de façon assez reproductible dans la fissure occipito-temporale gauche, à travers différentes cultures et systèmes d'écriture (Bolger et al., 2005; Nakamura et al., 2005). Par ailleurs, la VWFA est capable de reconnaître les lettres indépendamment de la case, de la position, de la taille, et même lorsque les mots sont présentés de façon subliminale (non-consciente) (Dehaene et al., 2001, 2005). Des lésions sur ce site produisent une perte de la reconnaissance rapide et parallèle des lettres et le temps de lecture devient alors dépendant de la longueur des mots, en raison d'une lecture lettre à lettre chez les patients alexiques (Cohen, 2003). De plus, l'activité de cette même région est corrélée avec le niveau de lecture chez les enfants dyslexiques (van der Mark et al., 2009).

Toutes ces mises en évidences évoquent alors la question suivante : quel est le rôle de cette partie du cortex chez les non-lecteurs ?

Pour envisager cette question, une certaine mise en contexte doit être menée. En fait, le langage parlé a pu émerger chez l'homo sapiens il y a environ 100.000 à 400.000 ans. En revanche, les plus anciens registres de systèmes d'écriture sont bien plus récents: environ 5400 ans. En termes d'évolution phylogénétique, quelques milliers d'années semblent insuffisants pour faire émerger des circuits cérébraux ayant comme fonction primaire la lecture. Stanislas Dehaene et Laurent Cohen avancent l'hypothèse d'un "recyclage neuronal" des circuits cérébraux dédiés à des fonctions proches qui se seraient reconvertis à la lecture (Dehaene, 2007; Dehaene et Cohen, 2007). Selon cette hypothèse, la pratique de la lecture pourrait par exemple déclencher un recyclage des neurones responsables de la détection des visages ou des objets (voir figure 3.1), qui commencerait alors à traiter les stimuli alphabétiques.



*Figure 3.1 : Image schématique représentant la mosaïque de régions spécialisées dans le traitement des stimuli visuels de différentes catégories sur la face ventrale du cortex temporal (d'après (Ishai et al., 2000; Hasson et al., 2003)).*

## **Réponses aux mots latéralisés à l'hémisphère gauche**

Laurent Cohen et ses collègues ont montré que le cortex temporal inférieur gauche (VWFA) est sensible aux régularités statistiques de l'orthographe, présentant une activation plus importante pour les vrais mots que pour les damiers ou pour des chaînes de consonnes (Cohen et al., 2002). Cette sélectivité de réponse du cortex temporal gauche à l'orthographe a été observée même lorsque les stimuli ont été présentés dans l'hémi-champ gauche (donc détectés par l'hémisphère droit). La région analogue à la VWFA dans l'hémisphère droit n'a pas montré cette distinction de réponses pour les mots. Enfin, dans un travail précédent, Laurent Cohen et ses collaborateurs avaient montré que la réponse cérébrale aux stimuli alphabétiques se trouve très rapidement latéralisée à l'hémisphère gauche, en environ 200ms après l'apparition du stimulus, aussi bien pour ceux présentés dans l'hémi-champ droit que pour ceux présentés à gauche du point de fixation (Cohen et al., 2000). En résumé, ces résultats semblent montrer que le cerveau est capable, après l'apprentissage de la lecture, de guider rapidement le flux d'informations visuelles orthographiques vers une région restreinte de l'hémisphère gauche devenue experte pour le décodage de ces symboles arbitraires, envoyant ensuite cette information à d'autres régions pour permettre au lecteur d'avoir accès aux sons (phonologie) et aux sens (sémantique) des mots.

En revanche, chez certains sujets « atypiques », la latéralisation du langage se concentre dans l'hémisphère droit et pour ces sujets la réponse aux stimuli orthographiques a lieu également autour de 200ms mais cette fois-ci dans le cortex occipito-temporal droit (Cai et al., 2008, 2010). Les réponses dans les régions plus précoces du traitement des stimuli orthographiques ne souffrent pas, également pour ces sujets, d'une influence de la latéralisation du langage.

A la suite de ces travaux, Urs Maurer de l'université de Cornell et ses collègues ont vérifié l'influence de la familiarité avec le système d'écriture sur les réponses cérébrales

(Maurer et al., 2008). Ils ont ainsi testé des américains et des japonais en présentant visuellement des stimuli en écriture japonaise (kanji et kana) et en anglais (alphabet latin). Les participants japonais étant familiers de toutes les écritures présentées alors que les américains ne connaissaient que l'anglais. Les participants devaient indiquer, en appuyant sur un bouton, quand, lors d'une séquence de stimuli, deux images se répétaient (« one back task » en anglais). Les stimuli étaient présentés en blocs séparés et l'activité cérébrale était enregistrée avec l'EEG. Les résultats ont montré à nouveau une latéralisation très précoce des réponses (autour de 200ms) à l'hémisphère gauche pour toutes les écritures en japonais, mais seulement chez les japonais. Les potentiels évoqués à ces stimuli étaient bilatéraux chez les américains. En revanche, les mots écrits en anglais évoquaient des réponses latéralisées à gauche pour les américains et les japonais. Ces résultats montrent que même pour les systèmes non-alphabétiques, il existe une réponse précoce latéralisée à l'hémisphère du langage, mais seulement si on sait décoder (lire) cette écriture.

## ***Invariance gauche-droite de la perception des images***

Différentes expériences ont démontré l'existence au sein du système visuel humain d'un mécanisme « d'invariance en miroir ». Ce mécanisme permet la reconnaissance immédiate d'une image ou d'une silhouette vue précédemment sous un autre profil (gauche ou droite), comme par exemple celle d'un prédateur, pouvant donc être utile pour la survie. L'invariance en miroir est présente très tôt dans le développement et est également constaté chez les primates non-humains et chez d'autres animaux, ce qui suggère une origine phylogénétique plus ancienne ou une coévolution.

## **L'invariance en miroir chez les animaux**

### **Chez le pigeon**

Beale et Corbalis de l'université d'Auckland en Nouvelle Zélande, ont entraîné des pigeons à identifier l'image d'une ligne inclinée à 60 degrés et de l'associer à la récompense (nourriture) (Beale et al., 1972). Après l'habituation, ils ont montré aux pigeons dans la phase

de test des images de lignes inclinées selon différentes orientations et ont compté le nombre de tentatives pour se nourrir. Comme prévu, les animaux ont pu identifier l'image à 60 degrés en faisant plus de tentatives de se nourrir. En revanche, une augmentation des tentatives à se nourrir a été également observée pour l'image à 120 degrés, c'est-à-dire, l'image en miroir de la cible originale. De plus, les connexions inter-hémisphériques d'un autre groupe de pigeons ont sectionnées intégralement. Pour ces pigeons dont les hémisphères cérébraux ne communiquaient plus, seule l'orientation initialement renforcée (60 degrés) déclencheait la recherche de nourriture, supprimant donc l'effet d'invariance en miroir. Les auteurs pensent que le mécanisme d'invariance en miroir repose donc sur un transfert d'informations d'un hémisphère à l'autre, mais en miroir, compte tenu de l'anatomie des connections entre les hémisphères, qui s'organise de façon homotopique (localisation équivalente dans les deux hémisphères).

Nancy Mello, de Boston, a également habitué les pigeons à une orientation donnée mais avec un entraînement mono-oculaire. Lorsque les animaux sont testés avec l'autre œil découvert, ils vont chercher la nourriture préférentiellement quand l'image en miroir est présentée, suggérant également un rôle du transfert inter-hémisphérique dans l'invariance en miroir (Mello, 1965, 1967). Toutefois il faut noter que le système visuel du pigeon est différent de celui de l'homme: les images présentées sur un œil atterrissent sur l'hémisphère opposé.

## Chez le singe

Des expériences chez les singes macaques (Logothetis et al., 1995; Logothetis et Pauls, 1995) ont montré que lorsqu'ils apprennent à reconnaître une image géométrique sans signification particulière parmi d'autres semblables (voir figure 3.2A) et que cette image cible en 3D est tournée de gauche à droite par paliers de 10 degrés sur la profondeur du champ, on observe une confusion avec la version inversée en miroir de la cible, mais pas pour les autres rotations (figure 3.2 B). Les neurones uniques enregistrés dans le cortex inféro-temporale (IT) se comportent de la même façon, à savoir, qu'ils présentent une invariance en miroir pour le stimulus préféré (figure 3.2 C).

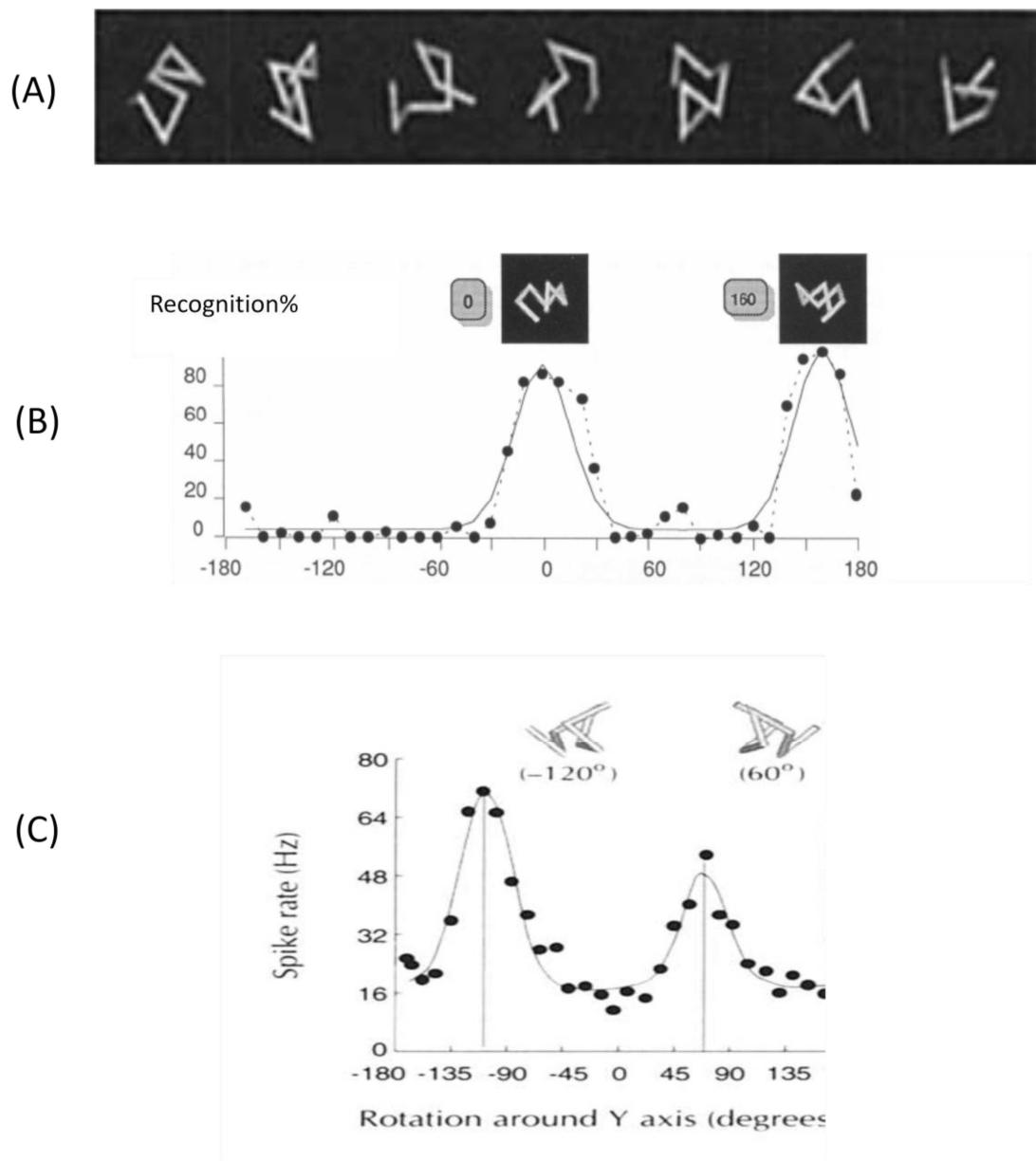


Figure 3.2: image schématique représentant les résultats comportementaux et les réponses des neurones uniques du cortex inféro-temporale (IT) du singe macaque, d'après les travaux de Logothetis et collaborateurs (Logothetis et al., 1995; Logothetis et Pauls, 1995). En (A) les différents stimuli (formes arbitraires) que les singes ont été entraînés à distinguer. En (B) les réponses comportementales selon les diverses rotations du stimulus renforcé: le singe reconnaît l'orientation originale mais répond également lorsque elle atteint pratiquement 180 degrés, c'est-à-dire, sa version en miroir. En (C) les réponses neuronales, sélectives pour un exemplaire, mais également pour son image en miroir.

De plus, Rollenhagen & Olson (Rollenhagen, J.E. et Olson, C.R., 2000) ont mis en évidence qu'il s'agit bien d'une invariance sur l'axe horizontal (gauche-droite) et pas sur l'axe vertical. Très récemment, Freiwald et Tsao (Freiwald et Tsao, 2010) ont montré les différents types de réponses aux visages tout au long de la hiérarchie du cortex IT du singe. Les réponses dans la partie la plus postérieure est spécifique à la rotation mais non-spécifique à l'identité du visage, témoignant donc d'un intérêt quant aux aspects visuels de plus bas niveau. Le niveau intermédiaire (appelé AL) présente une invariance en miroir, tout en étant sensible à l'identité du visage. Enfin, la partie la plus antérieure du cortex (appelé AM) présente à son tour une réponse plus abstraite, c'est-à-dire, répondant au visage préféré quelque soit son degré de rotation.

### **Chez d'autres animaux**

Cette capacité à reconnaître les images de façon invariante en miroir semble être présente aussi chez des animaux plus simples comme le chat (Warren, 1969) ou même la pieuvre (Sutherland, 1960b, 1960a).

### **L'invariance en miroir chez les bébés humains**

Marc Bornstein de l'université de New York et ses collaborateurs ont vérifié si les bébés humains de 3-4 mois présentaient déjà l'invariance en miroir pour plusieurs types de stimuli (visages humains, traits simples, figures géométriques) en mesurant le temps d'observation des bébés (Bornstein et al., 1978). Pendant l'étape d'habituation (60 secondes), un visage en profil droit était présenté. Suivait une phase de test (10 secondes par stimulus), lors de laquelle les temps d'observation des bébés aux différents stimuli étaient évalués par deux juges indépendants à partir des enregistrements vidéo. Les bébés regardaient plus longtemps un nouveau visage qu'un visage auquel ils avaient été habitué, que ce soit sous son profil original ou sa version en miroir. Le même résultat a été obtenu pour les traits simples : le stimulus constitué par un trait incliné de 45 degrés à gauche (habitué) était moins regardé que les traits verticaux. Mais le trait incliné de 45 degrés à droite était également moins regardé, ce qui indique donc une invariance en miroir également pour les traits simples. Malheureusement pour l'expérience avec les figures « géométriques » (espèce de C carré ( [ )

présentés avec divers angles de rotation) les chercheurs ont utilisé une approche entre-groupes qui nous a semblé peu appropriée étant donné le niveau de variabilité individuelle des réponses mis en évidence dans les tâches précédentes.

Il est important de noter que cette invariance en miroir chez les bébés de 4 mois est présente malgré une bonne discrimination de l'orientation en général, comme par exemple lorsque deux lignes diffèrent entre elles de 10 ou 20 degrés (Bornstein et al., 1986), ou quand les visages ou figures géométriques sont tournées « tête en bas » (McGurk, 1970).

Une question se pose alors : quand est-ce que l'invariance en miroir émerge chez le bébé humain ? Dès la naissance ? En fait, chez les *nouveau-nés*, l'invariance en miroir semble ne pas être présente comme le suggère l'étude de Slater et collaborateurs (Slater et al., 1988). Après habituation des nouveau-nés aux grilles orientées à 45 degrés, un regain d'attention pour les grilles présentées selon de nouvelles orientations mais également pour les grilles en miroir a été observé. L'invariance en miroir nécessiterait donc quelques mois de maturation après la naissance pour être opérationnelle.

## **L'invariance en miroir chez l'homme adulte**

Des études comportementales chez l'homme ont mis en évidence une facilitation, au niveau de la vitesse de dénomination et des réponses correctes, lorsqu'une cible est précédée (même de plusieurs minutes) par une amorce identique mais présentée en miroir (Biederman et Cooper, 1991, 2009; Stankiewicz et al., 1998). Il a été montré que cela n'était pas dû à une facilitation lexicale, mais bien visuelle, car l'amorçage disparaissait dans les expériences contrôles avec des paires de même nom (mais différentes visuellement).

Au niveau cérébral, Patrick Vuilleumier, de Genève, a pu montrer par l'IRMf, en utilisant aussi un paradigme d'amorçage avec des dessins d'objets, des réponses invariantes à l'orientation gauche-droite dans le cortex visuel ventral (gyrus fusiformes bilatéraux) (Vuilleumier et al., 2005). En manipulant l'attention du sujet vers l'un des deux dessins présentés simultanément mais en différentes couleurs au centre de l'écran, ils ont révélé que cette réponse invariante à l'orientation a été observée à la fois pour les stimuli perçus attentivement mais aussi pour ceux traités sans attention. D'autres chercheurs ont également

trouvé des réponses cérébrales invariantes à l'orientation gauche-droite dans les régions du cortex visuel de haut niveau (Eger, 2004).

Un très récent travail du groupe de Nancy Kanwisher du MIT en Boston, en collaboration avec Elisabeth Spelke de Harvard, a porté sur l'invariance en miroir des paysages et objets (Dilks et al., 2011). L'argument de base étant que pour les paysages (tout comme pour les lettres de l'alphabet), il est *pertinent* de discriminer l'orientation gauche-droite afin de guider l'action à mettre en place. Cela n'était pas le cas pour les objets isolés choisis pour l'expérience. La tâche des sujets était orthogonale à la question de l'orientation: elle consistait à juger si les paires de stimuli (images fixes, pas de vidéos) se déplaçaient vers la même direction ou non. Tout comme dans le travail de Freiwald et Tsao (Freiwald & Tsao, 2010), Dilks et ses collègues ont trouvé des régions plus postérieures qui répondaient aux *objets* en discriminant leur orientation gauche-droite, tandis qu'une région intermédiaire dans la hiérarchie (scissure fusiforme postérieur) a présenté une réponse invariante en miroir. Pour les *paysages*, contrairement à leurs prédictions, le gyrus para-hippocampique [en anglais PPA pour Parahippocampal Place Area] a présenté des réponses invariantes à l'orientation gauche-droite. En revanche, deux régions de la voie dorsale qui montraient une prédilection pour les paysages (la scissure occipitale transversale et le complexe retrosplenial) ont présenté une discrimination pour l'orientation. L'interprétation des auteurs a été que la reconnaissance des paysages par la voie ventrale ne prend pas en compte l'orientation des paysages, mais la voie dorsale (impliquée dans la localisation spatiale et l'action) en revanche discrimine l'orientation des paysages.

## L'impact de l'alphabétisation sur l'invariance en miroir

Est-ce que l'apprentissage de la lecture peut influencer la capacité de discrimination de l'orientation gauche-droite des images?

En effet, lorsqu'on apprend à lire, nous sommes obligés d'inhiber ce mécanisme spontané de généralisation en miroir, car chacune des lettres est écrite selon une orientation fixe. D'ailleurs certaines lettres écrites en miroir se transforment d'autres, comme par exemple le 'p' et 'q', ou le 'd' et 'b'. Une bonne mise en évidence du caractère inné de la

généralisation en miroir est l'observation de l'écriture en miroir chez les enfants au début de l'apprentissage à l'école (Cornell, 1985).

### L'impact des différents systèmes d'écriture sur la discrimination en miroir

Danziger et Pederson se sont posé la question de savoir si le système d'écriture *per se* pouvait avoir un impact sur la distinction gauche-droite. Ils ont conduit une étude exploratoire sur dix systèmes d'écriture différents dans divers pays, en ayant parfois recours des sujets illettrés (Danziger et Pederson, 1998). Une paire d'images géométriques sur feuille de papier était présentée simultanément aux participants (exemple sur la figure 3.3). Les sujets devraient juger si la figure de droite était contenue ou pas dans celle de gauche. Il leurs avait été explicitement donné pour instruction de designer les paires en miroir comme différentes.

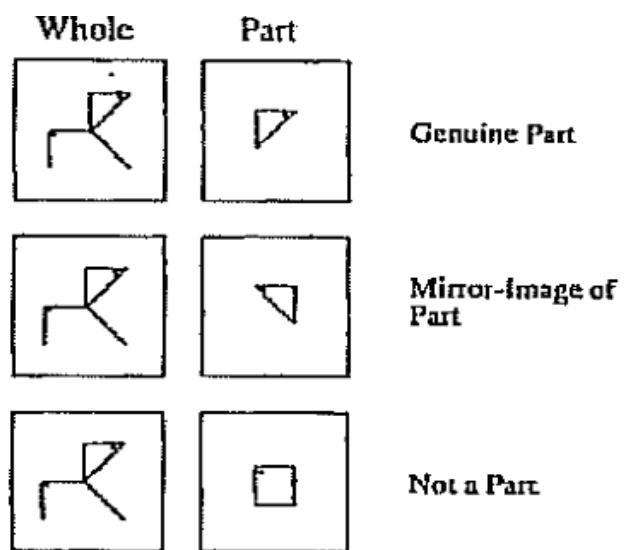


Figure 3.3 : exemples de stimuli utilisés dans la tâche de discrimination de l'orientation de Danziger et Pederson (1998).

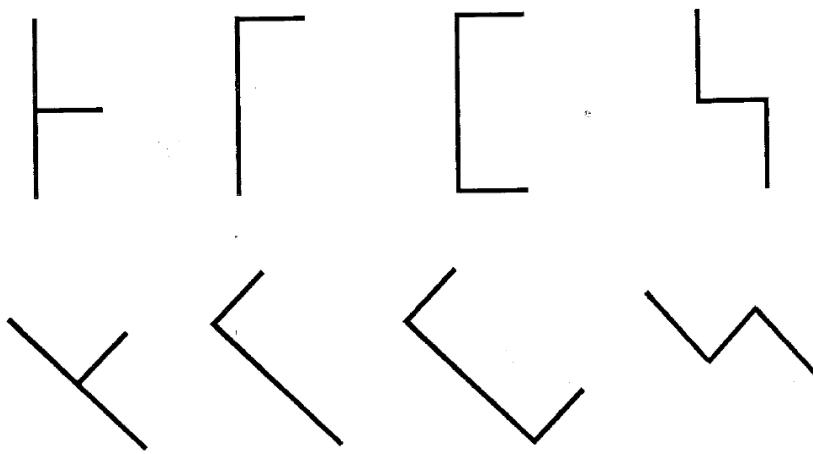
L'étude présente néanmoins des limites importantes. Par exemple, l'utilisation de 5 modèles différents d'images seulement (avec 3 combinaisons possibles), n'a donné lieu qu'à 15 essais au total par sujet. En revanche, pour s'assurer de la bonne compréhension de l'exercice, un entraînement préalable à l'étude a été mené sur un matériel similaire en

*superposant* les paires d’images (avec un papier transparent) pour démontrer que les paires en miroir étaient « différentes ». De façon générale, les lettrés ont mieux discriminé les paires en miroir que les illettrés. En revanche pour l’écriture Tamil, en Inde, les lettrés et illettrés n’ont pas montré de différence significative dans leurs performances. Il faut savoir que dans le système d’écriture curviligne du Tamil, il n’existe pas de lettres en miroir comme ‘b’ et ‘d’. Les auteurs ont suggéré que la présence de ce type de paire de lettres est nécessaire pour déclencher une discrimination automatique de l’orientation.

Quelques années plus tard, Pederson a conduit une étude un peu plus contrôlée (Pederson, 2003). Pendant deux secondes, il présentait sur l’écran d’un ordinateur les mêmes figures que celles utilisées dans l’étude précédente, à une exception près : le petit point de repère à l’intérieur des images avait été retiré, rendant la tâche légèrement plus difficile. Les résultats pour les illettrés et les lettrés exclusifs du Tamil étaient à nouveau mauvais. Plus intéressant en revanche, l’inclusion d’un groupe de lecteurs à la fois du Tamil et de l’alphabet latin (ayant donc une bonne discrimination entre ‘b’ et ‘d’ ou entre ‘p’ et ‘q’) a démontré leur capacité à faire correctement cette discrimination de l’orientation des images.

## **L’impact d’une autre expertise visuelle sur l’invariance en miroir**

Arlette Verhaeghe et Régine Kolinsky de l’université de Bruxelles, ont exploré la question de l’influence d’une autre expertise visuelle sur l’invariance en miroir, tout en séparant le facteur de l’apprentissage de la lecture (Verhaeghe et Kolinsky, 1992). Pour cela elles ont testé des lettrés ( $n=40$ ) et des illettrés ( $n=66$ ) présentant une moyenne d’âge d’un peu plus de 50 ans. Des paires d’images, soit identiques, soit inversées en miroir, devraient être jugées comme "égales" ou "différentes" respectivement (*Jugement d’orientation*). Les images (dessins sur une feuille de papier) sont reproduites sur la figure 3.4. Les stimuli pouvaient avoir un axe principal vertical (stimuli de la première ligne sur la figure) ou oblique (deuxième ligne).



*Figure 3.4: Stimuli utilisés dans le travail de Verhaeghe et Kolinsky, 1991*

Deux types de présentations ont été utilisées: *séquentielle* (2 secondes environ pour la première image, suivi d'un intervalle d'environ 5 secondes, puis présentation de la deuxième image jusqu'à la réponse); et *parallèle* (présentation simultanée). Les résultats ont montré que les lettrés réalisaient la tâche à la perfection (98%) dans toutes les conditions, tandis que les illettrés ont montré une moyenne d'environ 80% de bonnes réponses pour les présentations séquentielles et de 70% pour les parallèles. Ce résultat surprenant concernant le type de présentation, aux dépens de la présentation *parallèle* est interprété par les auteurs comme une performance spontanément meilleure chez les illettrés pour les processus holistiques (présentation séquentielle) vis-à-vis des processus analytiques (présentation parallèle). Les stimuli étaient en effet assez grands (20cm de diamètre) ce qui a pu favoriser une analyse plus holistique dans la présentation séquentielle. En outre, l'axe des figures (vertical ou oblique) n'a pas influencé les résultats. L'aspect le plus intéressant de ce travail est néanmoins l'analyse qui suit. Verhaeghe et Kolinsky décident de séparer les illettrés selon la présence ou l'absence d'une pratique régulière de l'activité de bordage des tissus ("rendeiras" en portugais). Cette activité, exigeant la compréhension et la reproduction de motifs sous différentes orientations, pourrait avoir une influence sur leurs capacités à discriminer les orientations, malgré l'absence d'alphabétisation. Les résultats montrent en effet que les "rendeiras" étaient significativement plus performantes que les "non-rendeiras". En conclusion, la pratique d'une activité culturelle, qu'elle soit la lecture ou une autre expertise visuelle demandant une discrimination des images en miroir, brise le mécanisme spontanée d'invariance en miroir du système visuel.

Plus récemment, Gregory et McCloskey ont souhaité préciser l'axe suivant lequel les confusions en miroir se produisent le plus souvent, en dissociant l'axe intrinsèque à l'image des axes extrinsèques (vertical et horizontal), par une présentation des stimuli en diagonale (Gregory et McCloskey, 2010). Ils montrent, par une série d'expériences, que les erreurs sont plus fréquentes lorsqu'on manipule l'orientation des images sur l'*axe principal* (plus grande longueur de l'objet), plutôt que sur l'axe vertical *extrinsèque* à l'image. Malgré l'intérêt de cette démonstration, ces résultats restent néanmoins peu pertinents pour les images qui ne dissocient pas les axes intrinsèques et extrinsèques comme par exemple l'écriture alphabétique.

### **Conclusion :**

L'invariance en miroir, utile dans la nature pour la reconnaissance visuelle, est présente chez divers animaux (Sutherland, 1960b; Mello, 1965, 1967; Warren, 1969; Beale et al., 1972; Logothetis et al., 1995; Rollenhagen, J.E. et Olson, C.R., 2000), y compris chez l'homme (Stankiewicz et al., 1998; Eger, 2004; Vuilleumier et al., 2005; Biederman et Cooper, 2009; Dilks et al., 2011). Ce mécanisme devient opérationnel quelques mois après la naissance (McGurk, 1970; Bornstein et al., 1978; Slater et al., 1988). Lorsqu'on apprend à lire, cette invariance en miroir doit être brisée afin qu'on puisse reconnaître correctement les lettres et les écrire dans la bonne orientation. La pratique culturelle de la lecture dans le système alphabétique romain (qui demande notamment la distinction entre 'b' et 'd'), ainsi que d'autres activités demandant cette même discrimination gauche-droite (Verhaeghe et Kolinsky, 1992), modifient le comportement des sujets lorsqu'il s'agit de juger des images en miroir. De plus, les systèmes d'écriture dont l'orientation gauche-droite n'est pas cruciale pour la distinction des lettres, semblent avoir un moindre impact sur le mécanisme d'invariance en miroir (Danziger et Pederson, 1998; Pederson, 2003).

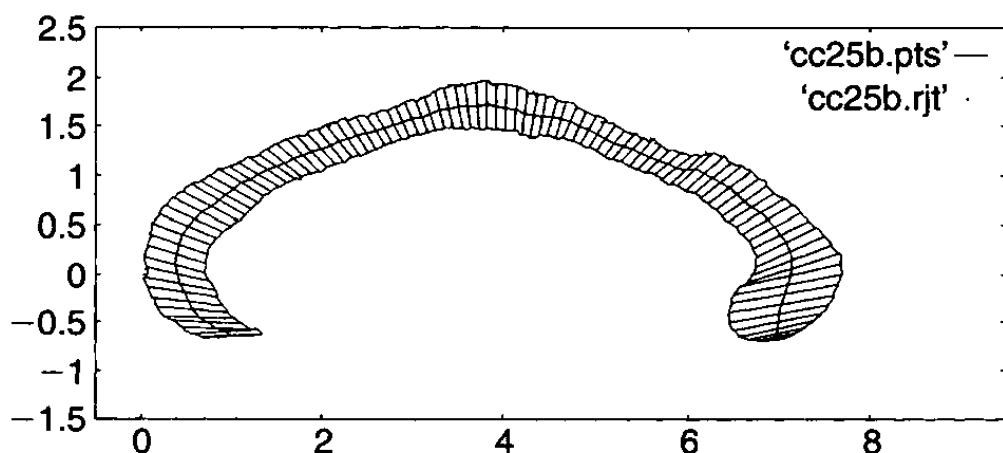
Nous allons approfondir la question de l'impact de l'alphanumerisation sur l'invariance en miroir en exposant les résultats de nos propres travaux comportementaux et en neuro-imagerie, qui seront décrits dans la partie II.

## **Chapitre 4: Impact de l’alphabétisation sur l’anatomie cérébrale**

L’apprentissage peut-il littéralement modeler l’anatomie du cerveau ? Des travaux en neurosciences cognitives, ont montré que tel est le cas. Une étude princeps a démontré que l’apprentissage du jonglage induisait une augmentation de la matière grise spécifiquement dans les régions sensibles au mouvement (V5/MT+) (Draganski et al., 2004). On peut se poser alors la question suivante : existe-t-il des différences anatomiques entre le cerveau des personnes qui ont acquis l’expertise de la lecture et de celles qui ne la pratiquent pas?

### ***Le corps calleux illettré est plus fin sur le tiers postérieur***

Castro-Caldas et son équipe ont fait l’analyse des données *anatomiques* (IRM à 1.5 Tesla) de 18 femmes illettrées comparés à 23 femmes lettrées de niveaux socio-économiques équivalents (ayant un niveau d’éducation variable entre 3 et 16 ans) (Castro-Caldas et al., 1999). Les chercheurs ont pu constater que la partie postérieure du corps calleux (structure composée de fibres nerveuses qui relient les deux hémisphères), celle qui connecterait les lobes pariétaux droit et gauche, était relativement plus épaisse chez les lettrés. La méthode utilisée consistait à segmenter les images des corps calleux en 100 parties égales et à calculer la différence entre les groupes pour chaque segment (figure 4.1).



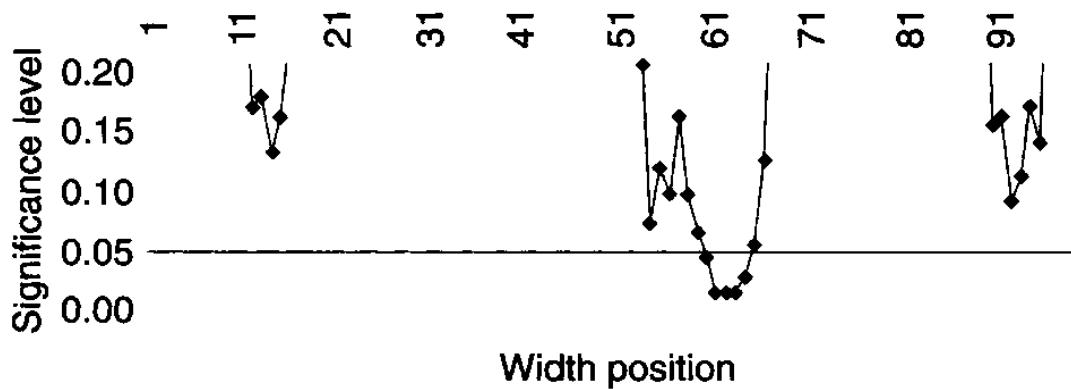
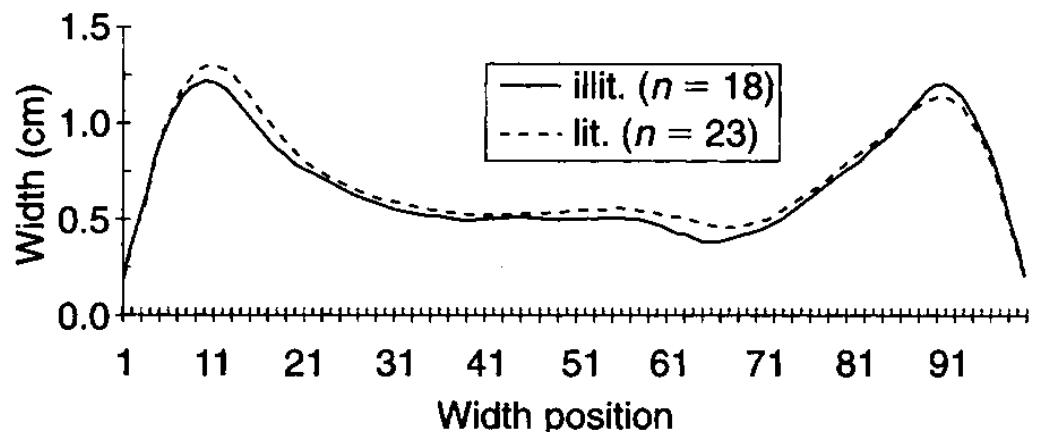
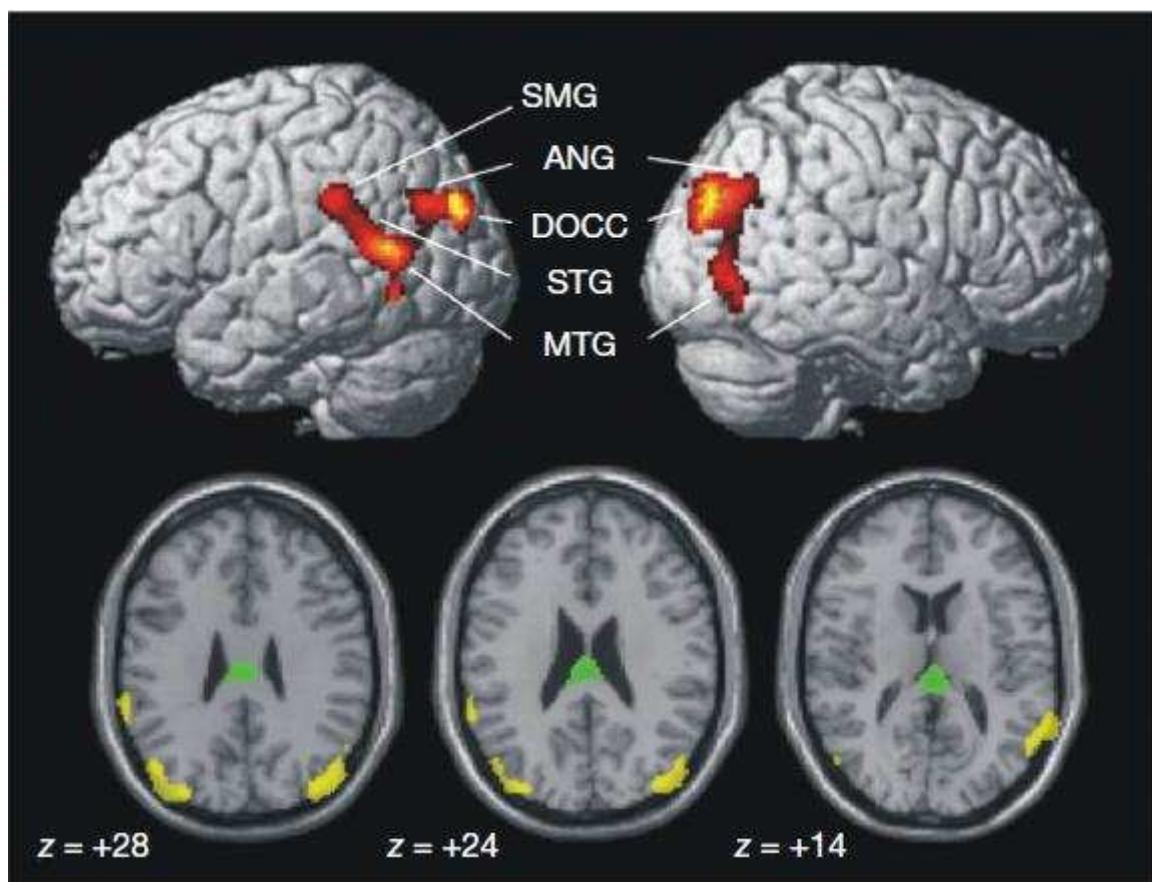


Figure 4.1 : comparaison des corps calleux entre lettrés et illettrés d'après l'étude de Castro-Caldas (1999). L'image du haut montre la segmentation en 100 parties égales ; celle du milieu montre les moyennes de groupe pour chacun de ces segments ; l'image inférieure mette en évidence les différences significatives entre les groupes.

On note une différence significative entre les groupes, entre les segments 60 et 64, qui correspond à la *partie antérieure du tiers postérieur* du corps calleux. La valeur moyenne pour les lettrés dans ce segment est de  $5.0 \pm 0.2$ mm et celle des illettrés de  $4.2 \pm 0.2$ mm.

Une dizaine d'années plus tard, Manuel Carreiras et ses collaborateurs du centre de recherche Basque de San Sébastien- Espagne ont répliqué les résultats de Castro-Caldas, mais cette fois-ci en comparant l'anatomie du cerveau des illettrés à celle des ex-illettrés (Carreiras et al., 2009). Les participants des deux groupes étaient issus de la *guérilla* colombienne, et étaient donc assez comparables du point de vue socioculturel. Les résultats ont montré des corps calleux plus épais chez les ex-illettrés, mais cette fois-ci sur le splenium, c'est-à-dire, légèrement plus postérieurement que dans l'étude de Castro-Caldas. La même méthode d'analyse anatomique voxel-par-voxel (en anglais VBM pour Voxel Based Morphometry) mais cette fois-ci dans la matière grise a mis en évidence que les ex-illettrés présentaient des cortex plus épais que les illettrés dans les régions suivantes: bilatéralement dans les gyrus angulaires, les cortex occipitaux postérieurs, temporaux moyens et à gauche dans les gyrus supra-marginal et temporal supérieur (voir figure 4.2). Aucune différence n'a été trouvée dans la VWFA.



*Figure 4.2 : Comparaison ex-illettrés minus illettrés dans l'analyse anatomique par VBM sur la matière grise (en rouge en haut et en jaune en bas) et la matière blanche (en vert en bas) d'après les travaux de Carreiras et collaborateurs (Carreiras et al., 2009).*

### **Conclusion:**

Les données relatives à l'impact de l'éducation sur l'anatomie cérébrale adulte sont rares (Castro-Caldas et al., 1999; Carreiras et al., 2009). Toutefois, ils convergent en ce qui concerne le corps calleux dans sa partie postérieure, qui serait plus fin chez les illettrés que chez ceux qui ont appris à lire (pendant l'enfance ou même plus tardivement). Dans l'étude de Carreiras, des parties du cortex semblent également plus fines chez les illettrés, sur un large réseau: bilatéralement sur les gyrus angulaires, les cortex occipitaux postérieurs, temporaux moyens et à gauche sur les gyrus supra-marginal et temporal supérieur.

## **PARTIE II : NOS RECHERCHES**

Nous allons faire une très brève introduction avant chaque étude réalisée au cours de ce doctorat. Nous reproduirons l'article déjà publié ou en voie de publication dans sa version originale en anglais.

### ***Expérience 1: L'impact de l'éducation sur les circuits visuels et du langage parlé (étude IRMf)***

Comment l'acquisition de la lecture modèle-t-elle le cerveau ? Quel est l'impact de l'entraînement intensif de la détection des lettres sur le système visuel? Si une région devient spécialisée pour la détection visuelle des mots, quel rôle exerce-t-elle en absence de l'apprentissage de la lecture ? Quelle influence cette conversion des lettres et des mots écrits en sons du langage parlé, qui nous permet "d'entendre avec les yeux", a-t-elle sur le fonctionnement des réseaux du langage ? La correspondance graphème-phonème est-elle capable de raffiner le code phonologique ? Ceux qui ont appris à lire à l'âge adulte sont-ils sujets aux mêmes modifications des fonctions cérébrales que ceux qui ont été alphabétisés dès l'enfance ?

Pour répondre à ces questions nous avons examiné l'activité cérébrale de sujets lettrés, illettrés et ayant appris à lire seulement à l'âge adulte, au cours des tâches cognitives de perception visuelle et auditive à l'aide de l'IRMf. Cette étude a été possible grâce à un travail collectif, dans le cadre d'une collaboration internationale avec des collègues au Portugal, en Belgique et au Brésil, sous la coordination et la participation active du Professeur S. Dehaene.

Les résultats, publiés dans la revue *Science*, ont fait l'objet d'un article les résumant dans la revue française *Médecine/Sciences*. Nous reproduisons plus bas ces deux articles.

## REMERCIEMENTS

Nous remercions Dr Claudia Montero-Menei, Pr Paul Schiller, Pr Marie-Claire Venier, Pr Catherine Passirani et Laurence Sindji pour leur contribution à ce travail. Cette étude a été réalisée avec le financement de l' Association « En avant la vie » et de VKF Krebsforschung gGmbH (Berlin, Allemagne).

## CONFLIT D'INTÉRÊTS

Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêts concernant les données publiées dans cet article.

## RÉFÉRENCES

1. Stupp R, Hegi ME, Mason WP, et al. Effects of radiotherapy with concomitant and adjuvant

- temozolomide versus radiotherapy alone on survival in glioblastoma in a randomised phase III study: 5-year analysis of the EORTC-NCIC trial. *Lancet Oncol* 2009 ; 10 : 459-66.
2. Kosztowski T, Zaidi HA, Quinones-Hinojosa A. Applications of neural and mesenchymal stem cells in the treatment of gliomas. *Expert Rev Anticancer Ther* 2009 ; 9 : 597-612.
3. Delcroix GJ, Curtis KM, Schiller PC, et al. EGF and bFGF pre-treatment enhances neural specification and the response to neuronal commitment of MIAMI cells. *Differentiation* 2010 ; 80 : 213-27.
4. Bexell D, Scheding S, Bengzon J. Toward brain tumor gene therapy using multipotent mesenchymal stromal cell vectors. *Mol Ther* 2010 ; 18 : 1067-75.
5. Horcajada P, Serre C, Férey G, et al. Des nanovecteurs hybrides pour la restitution retard de médicaments antitumoraux et antiviraux. *Med Sci (Paris)* 2010 ; 26 : 761-7.
6. Jain KK. Use of nanoparticles for drug delivery in glioblastoma multiforme. *Expert Rev Neurother* 2007 ; 7 : 363-72.
7. Roger M, Clavreul A, Venier-Julienne MC, et al. Mesenchymal stem cells as cellular vehicles for delivery of nanoparticles to brain tumors. *Biomaterials* 2010 ; 31 : 8393-401.
8. Roger M, Clavreul A, Venier-Julienne MC, et al. The potential of combinations of drug-loaded nanoparticle systems and adult stem cells for glioma therapy. *Biomaterials* 2011 ; 32 : 2106-16.
9. Charbord P, Casteilla L. La biologie des cellules souches mésenchymateuses d'origine humaine. *Med Sci (Paris)* 2011 ; 27 : 261-8.
10. Vinatier C, Bordenave L, Guicheux J, Amédée J. Les cellules souches en ingénierie des tissus ostéoarticulaires et vasculaires. *Med Sci (Paris)* 2011 ; 27 : 289-96.
11. Lazennec G. Les cellules souches mésenchymateuses : armes ou dangers pour le traitement des cancers ? *Med Sci (Paris)* 2011 ; 27 : 285-8.

## NOUVELLE

### L'impact de l'apprentissage de la lecture sur le cerveau

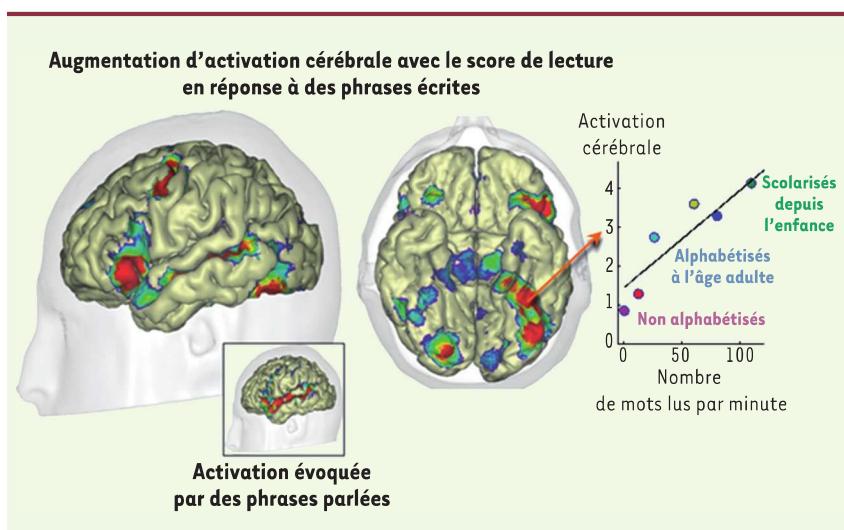
Stanislas Dehaene, Felipe Pegado, Lucia W. Braga, Paulo Ventura, Gilberto Nunes Filho, Antoinette Jobert, Ghislaine Dehaene-Lambertz, Régine Kolinsky, José Morais, Laurent Cohen

► Par le biais de quels mécanismes cérébraux parvenons-nous à apprendre à lire ? L'acquisition de la lecture soulève plusieurs questions importantes pour la psychologie et les neurosciences cognitives. L'écriture est une invention trop récente (environ 5 400 ans) pour avoir influencé l'évolution génétique humaine. Son apprentissage ne peut donc reposer que sur un recyclage de régions cérébrales préexistantes et dédiées à d'autres fonctions, mais suffisamment plastiques pour se réorienter vers l'identification des signes écrits et leur mise en liaison avec le langage parlé [1, 2]. Il se pourrait alors que le gain de fonction lié à l'apprentissage de la lecture s'accompagne d'une compétition corticale qui conduise à la perte partielle ou totale d'autres fonctions plus anciennes dans l'évolution. C'est à travers ce cadre théorique du « recyclage neuronal » que nous avons essayé de clarifier l'impact de l'apprentissage de la lecture sur le

cerveau, en soulevant deux questions symétriques : au niveau cortical, que gagnons-nous et que perdons-nous lorsque nous apprenons à lire ? Pour répondre à ces questions, nous avons comparé, par imagerie par résonance magnétique (IRM fonctionnelle), l'activité cérébrale d'adultes alphabétisés ou non, ainsi que de sujets non scolarisés mais ayant été alphabétisés à l'âge adulte (ex-illettrés). Nous avons examiné l'activité cérébrale en réponse à toute une batterie de stimulus : phrases parlées et écrites, mots et pseudo-mots parlés, images de visages, maisons, objets, damiers. Un total de 63 adultes ont participé à l'étude : 10 analphabètes, 22 ex-illettrés et 31 scolarisés depuis l'enfance. Notre recherche a été menée en parallèle au Portugal et au Brésil. Voici quelques dizaines d'années, il était encore relativement fréquent que des enfants dans ces deux pays ne puissent pas aller à l'école uniquement

S. Dehaene, F. Pegado, A. Jobert, G. Dehaene-Lambertz : Inserm, Cognitive neuroimaging unit, 91191 Gif sur Yvette ; CEA, DSV, I2BM, Neurospin center, 91191 Gif-sur-Yvette ; Université Paris Sud, Orsay, France. S. Dehaene : Collège de France, 11, place Marcelin Berthelot, 75005 Paris, France. LW. Braga, G. Nunes Filho : SARAH Network – International center for neurosciences and rehabilitation, QL 13, Lago Norte, 71.535-005 Brasilia, Brésil. P. Ventura : Faculty of psychology, University of Lisbon, Portugal. R. Kolinsky, J. Morais : Faculty of psychology, Université libre de Bruxelles (ULB), Brussels, Belgique. R. Kolinsky : Fonds de la recherche scientifique (FNRS), Brussels, Belgique. L. Cohen : Université Pierre et Marie Curie-Paris 6, Faculté de médecine Pitié-Salpêtrière, Paris, France ; AP-HP, Groupe hospitalier Pitié-Salpêtrière, Département de neurologie, Paris, France. [felipepegado@yahoo.com](mailto:felipepegado@yahoo.com)

en raison de leur environnement social (isolement relatif, milieu rural). Nos études ont été réalisées avec des imageurs IRM à 3 Tesla au centre NeuroSpin (Saclay) pour les volontaires portugais et au centre de recherches en



**Figure 1. Un aperçu des vastes réseaux cérébraux dont l'activité augmente avec le score de lecture, en réponse à des phrases écrites.** Dès qu'une personne sait lire, la réponse aux mots écrits augmente rapidement dans diverses aires visuelles, dont l'une est spécialisée dans l'analyse de la forme des lettres : la VWFA (graphe de droite ; chaque point représente un groupe de 10 ou 11 personnes). De plus, l'ensemble des régions de l'hémisphère gauche impliquées dans le traitement du langage parlé (médiaillon) devient susceptible de s'activer également en réponse au langage écrit. Chez les bons lecteurs, cette activation suscitée par la vision des mots écrits est pratiquement de même intensité que celle suscitée par l'audition du langage oral. Comment le soulignait l'écrivain Francesco de Quevedo, lire est donc bien, littéralement, « entendre avec les yeux » !

neurosciences de l'hôpital Sarah Lago Norte à Brasilia pour les volontaires brésiliens (sous la direction de Lucia Braga). Tous les volontaires étaient bien intégrés socialement. Par rapport aux études développementales qui examinent l'enfant avant et après l'alphabetisation, l'avantage de notre étude était de garder constant le facteur confondant de maturation cérébrale, d'étudier l'impact ultime de l'apprentissage de la lecture sur le cerveau adulte, et enfin de vérifier, chez les ex-illettrés, si la plasticité cérébrale était suffisante pour permettre l'apprentissage de la lecture à l'âge adulte. Grâce à ces travaux nous avons ainsi pu apporter des éléments de réponse à plusieurs questions essentielles.

### L'alphabetisation induit l'interaction des régions phonologiques et orthographiques

Comment les aires cérébrales impliquées dans la lecture se transforment-elles avec l'alphabetisation ? En examinant l'évolution de l'activation cérébrale en fonction de la vitesse de lecture (nulle chez les analphabètes et variable dans les autres groupes), nous avons montré que l'impact de l'alphabetisation est bien plus étendu que les études précédentes ne le laissaient penser [3, 4].

Apprendre à lire augmente les réponses des aires visuelles du cortex, non seu-

lement dans une région spécialisée pour la forme écrite des lettres (VWFA pour *visual word form area*) [5, 6], mais aussi dans l'aire visuelle primaire.

La lecture augmente également les réponses au langage parlé dans le cortex auditif, dans le *planum temporale* [7] - une région impliquée dans le codage des phonèmes (les plus petits éléments significatifs du langage parlé, comme « b » ou « ch »). On sait, depuis les travaux de José Morais à la fin des années 1970, que les analphabètes ne parviennent pas à réaliser des jeux de langage au niveau du phonème, telle que la délétion du premier son d'un mot (France → rance) [8]. Il est probable que l'alphabetisation raffine le code phonétique dans cette région. En outre, ce résultat permet de mieux interpréter les travaux réalisés chez les enfants et adultes dyslexiques (personnes d'intelligence normale qui présentent une difficulté spécifique d'apprentissage de la lecture), qui montrent également une réduction d'activation dans la même région [9] : cette réduction, au lieu d'être une cause de leur dyslexie, pourrait représenter plutôt une conséquence de leurs difficultés d'apprentissage de la lecture.

La lecture induit également une communication entre les réseaux du langage parlé et écrit : chez un bon lecteur, voir une phrase écrite active l'ensemble des aires du langage parlé. Il est intéres-

sant de noter que ces activations du réseau du langage parlé à partir de la modalité visuelle (lecture) atteignent, chez le bon lecteur, dans la plupart des régions, une intensité équivalente à celle évoquée par les stimulus parlés. Au niveau cérébral, lire correspond donc littéralement à « entendre avec les yeux ».

En outre, chez les lettrés, entendre un mot parlé permet d'activer automatiquement son code orthographique dans une aire visuelle spécialisée pour le codage orthographique (VWFA). Cette activation ne survient que lorsque l'accès au code orthographique est utile à la tâche, par exemple pendant une tâche de décision lexicale, où l'on doit décider si ce qu'on entend est un mot réel ou un pseudo-mot. Ces résultats démontrent l'interaction rapide et flexible des régions phonologiques et orthographiques que l'apprentissage des correspondances graphème-phonème, au cours de l'alphabetisation, a fait émerger. Chez les personnes qui n'ont pas appris à lire, le traitement du langage est moins flexible et strictement limité à la modalité auditive.

### Réorganisation du cortex visuel

À quoi servent les aires cérébrales impliquées dans la lecture avant qu'une personne n'apprenne à lire ? L'apprentissage de la lecture implique-t-il toujours un gain de fonction, ou bien l'augmentation des réponses aux mots s'accompagne-t-elle de diminutions des réponses à d'autres catégories

visuelles ? Chez les analphabètes, l'aire visuelle de l'hémisphère gauche qui, chez les lecteurs, décode les mots écrits (la VWFA) répond à une fonction proche : la reconnaissance visuelle des objets et des visages. Dans cette région, au cours de l'apprentissage, la réponse aux visages diminue légèrement à mesure que la compétence de lecture augmente, et se déplace partiellement à l'hémisphère droit [10]. Le cortex visuel se réorganise donc, en partie par compétition entre l'activité nouvelle de lecture et les activités plus anciennes de reconnaissance des visages et des objets. On ne sait pas encore si cette compétition corticale entraîne des conséquences fonctionnelles pour la reconnaissance ou la mémoire des visages.

### Modifications cérébrales liées à l'alphabétisation à l'âge adulte

Les modifications cérébrales liées à l'alphabétisation peuvent-elles se produire à l'âge adulte ? Ou bien existe-t-il une période critique pour cet apprentissage dans la petite enfance ? La très grande majorité des effets de l'apprentissage de la lecture sur le cortex sont visibles autant chez les personnes scolarisées

dans l'enfance que chez celles qui ont suivi des cours d'alphabétisation à l'âge adulte. Ces dernières ont, certes, besoin de recruter un réseau cérébral plus vaste et n'atteignent que rarement les mêmes performances de lecture quand on les compare aux sujets scolarisés pendant l'enfance (Figure 1). Cependant, ces différences pourraient n'être dues qu'à la moindre pratique quotidienne chez les personnes ex-illettrées de notre échantillon. À performance de lecture égale, nous n'avons pas observé de différences prononcées des activations cérébrales chez les personnes qui ont appris à lire dans l'enfance ou à l'âge adulte. En résumé, les circuits de la lecture semblent rester plastiques tout au long de la vie.

### En conclusion

Ces résultats soulignent l'impact massif de l'éducation sur le cerveau humain. Ils nous rappellent également que la très grande majorité des expériences d'IRM cérébrale portent sur le cerveau éduqué. L'organisation cérébrale en l'absence d'éducation constitue un immense territoire largement inexploré. ♦

### Impact on the brain of learning to read

### CONFLIT D'INTÉRÊTS

*Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêts concernant les données publiées dans cet article.*

### RÉFÉRENCES

- Dehaene S. *Les neurones de la lecture*. Paris : Odile Jacob, 2007 : 480 p.
- Dehaene S, Cohen L. Cultural recycling of cortical maps. *Neuron* 2007 ; 56 : 384-98.
- Castro-Caldas A, Petersson KM, Reis A, et al. The illiterate brain. Learning to read and write during childhood influences the functional organization of the adult brain. *Brain* 1998 ; 121 : 1053-63.
- Carreiras M, Seghers ML, Baquero S, et al. An anatomical signature for literacy. *Nature* 2009 ; 461 : 983-6.
- Cohen L, Dehaene S, Naccache L, et al. The visual word form area: spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. *Brain* 2000 ; 123 : 291-307.
- Dehaene S, Le Clec'H G, Poline JB, et al. The visual word form area: a prelexical representation of visual words in the fusiform gyrus. *Neuroreport* 2002 ; 13 : 321-5.
- van Atteveldt N, Formisano E, Goebel R, Blomert L. Integration of letters and speech sounds in the human brain. *Neuron* 2004 ; 43 : 271-82.
- Moraes J, Cary L, Alegria PB, Bertelson J. Does awareness of speech as a sequence of phones arise spontaneously? *Cognition* 1979 ; 7 : 323-31.
- Blau V, Reithler J, van Atteveldt N, et al. Deviant processing of letters and speech sounds as proximate cause of reading failure: a functional magnetic resonance imaging study of dyslexic children. *Brain* 2010 ; 133 : 868-79.
- Kleinschmidt A. Retrouver le contenu de la conscience dans le « bruit » de la neuro-imagerie. *Med Sci (Paris)* 2011 ; 27 : 199-203.

## NOUVELLE

### Les acides ribonucléiques Régulation du staphylocoque doré et rôle dans la virulence

Philippe Bouloc, Brice Felden

P. Bouloc : Institut de génétique et microbiologie, CNRS/UMR 8621, IFR115, Centre scientifique d'Orsay, Université Paris Sud 11, bâtiment 400, 91405 Orsay Cedex, France.  
[Philippe.Bouloc@u-psud.fr](mailto:Philippe.Bouloc@u-psud.fr)  
B. Felden : Université de Rennes 1, Inserm U835, UPRES EA2311, Biochimie pharmaceutique, 2, avenue du Pr Léon Bernard, 35043 Rennes, France.  
[Brice.Felden@univ-rennes1.fr](mailto:Brice.Felden@univ-rennes1.fr)

► Le staphylocoque doré (*Staphylococcus aureus*) est une bactérie à Gram positif en forme de coque qui fait partie de la flore bactérienne du nez, du périnée et de la peau. Environ un cinquième de la population humaine en est porteur sain à long terme. Cependant, ce commensal est

aussi un redoutable pathogène opportuniste générant intoxications alimentaires et maladies allant d'infections cutanées à des septicémies mortelles. *S. aureus* est une cause majeure d'infections nosocomiales, et l'émergence de souches résistantes à diverses classes d'antibiotiques

constitue un grave problème de santé publique [1, 2]. Cette bactérie possède un arsenal impressionnant d'enzymes comprenant toxines, adhésines et molécules immunomodulatrices facilitant sa colonisation et le franchissement des barrières de l'hôte, ce qui lui confère une toxicité

*This copy is for your personal, non-commercial use only.*

**If you wish to distribute this article to others**, you can order high-quality copies for your colleagues, clients, or customers by [clicking here](#).

**Permission to republish or repurpose articles or portions of articles** can be obtained by following the guidelines [here](#).

**The following resources related to this article are available online at [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org) (this information is current as of March 8, 2011):**

**Updated information and services**, including high-resolution figures, can be found in the online version of this article at:  
<http://www.sciencemag.org/content/330/6009/1359.full.html>

**Supporting Online Material** can be found at:  
<http://www.sciencemag.org/content/suppl/2010/11/08/science.1194140.DC1.html>  
<http://www.sciencemag.org/content/suppl/2010/11/11/science.1194140.DC2.html>

This article **cites 43 articles**, 11 of which can be accessed free:  
<http://www.sciencemag.org/content/330/6009/1359.full.html#ref-list-1>

This article appears in the following **subject collections**:  
Neuroscience  
<http://www.sciencemag.org/cgi/collection/neuroscience>

# How Learning to Read Changes the Cortical Networks for Vision and Language

Stanislas Dehaene,<sup>1,2,3,4\*</sup> Felipe Pegado,<sup>1,2,3</sup> Lucia W. Braga,<sup>5</sup> Paulo Ventura,<sup>6</sup> Gilberto Nunes Filho,<sup>5</sup> Antoinette Jobert,<sup>1,2,3</sup> Ghislaine Dehaene-Lambertz,<sup>1,2,3</sup> Régine Kolinsky,<sup>7,8</sup> José Morais,<sup>7</sup> Laurent Cohen<sup>9,10,11</sup>

Does literacy improve brain function? Does it also entail losses? Using functional magnetic resonance imaging, we measured brain responses to spoken and written language, visual faces, houses, tools, and checkers in adults of variable literacy (10 were illiterate, 22 became literate as adults, and 31 were literate in childhood). As literacy enhanced the left fusiform activation evoked by writing, it induced a small competition with faces at this location, but also broadly enhanced visual responses in fusiform and occipital cortex, extending to area V1. Literacy also enhanced phonological activation to speech in the planum temporale and afforded a top-down activation of orthography from spoken inputs. Most changes occurred even when literacy was acquired in adulthood, emphasizing that both childhood and adult education can profoundly refine cortical organization.

**P**ractically all adult neuroimaging experiments are performed in highly educated college students. The observed brain architecture therefore reflects the influence of culture and education over and above spontaneous brain development (1, 2). Indeed, the acquisition of reading, a major event in children's lives, is now recognized as capable of changing both brain anatomy (3, 4) and brain activation (5–9). In the auditory modality, literacy leads to phonemic awareness, the ability to manipulate the smallest units of spoken language [i.e., phonemes (10)], and alters online speech processing (11–14). At the visual level, developmental neuroimaging studies in normal and dyslexic children show that, with reading acquisition, a specific brain site in left occipito-temporal cortex, which has been termed "visual word form area" (VWFA), starts to respond to orthographic stimuli in the learned script (15–19).

These observations leave many important questions unanswered. First, does literacy primarily lead to cooperative or to competitive effects

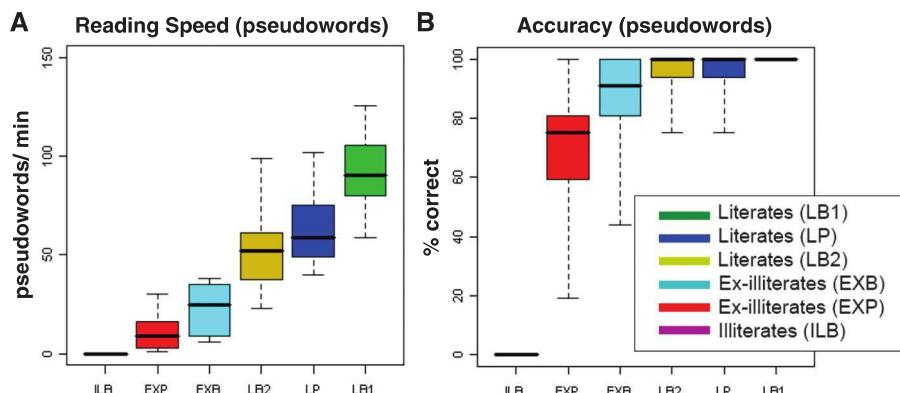
on cortical processing? Two theoretical positions can be contrasted. The first view, derived from animal studies of environmental enrichment and sensory plasticity, emphasizes that perceptual learning entails beneficial modifications of cortical maps, including sharpened receptive fields and neuronal tuning curves correlated with behavioral improvements (20–22). Without denying these positive effects, the second view emphasizes that reading is a cultural invention too recent to involve dedicated genetic or developmental mechanisms. Thus, during education, reading processes must invade and "recycle" cortical space devoted to evolutionary older functions, opening the possibility that these functions suffer as reading expertise sets in (2, 23). Much like expertise for nonface stimuli induces a reduction in face responses (24–26), reading, which recruits an identical cortical site in all cultures (27), might entail a reorganization of nearby responses to faces,

houses, and objects. We thus sought to understand which of these stimuli are processed in the VWFA area before reading and how their cortical representation, which gets refined during the school years (28), is affected by literacy.

A second issue is that, at present, most functional imaging studies of illiteracy only contrasted schooled versus unschooled adults. Because these studies did not include "ex-illiterate" adults who did not attend school but learned to read during adulthood, they confounded the effects of schooling and literacy. The only important exception (4) focused solely on how brain anatomy is changed by literacy. In this study, we separated the functional effects of schooling and literacy by comparing illiterates, ex-illiterates, and adults schooled in childhood.

**Populations studied and verification of literacy level.** We scanned a total of 63 Portuguese and Brazilian participants. Our sample included 32 unschooled adults (10 illiterates and 22 ex-illiterates with variable reading skills), and 31 schooled and literate adults. The latter group included 11 literate subjects matched to the illiterates in socio-economic status (SES) (29). Reading skills were verified through behavioral tasks of letter identification, word and pseudo-word reading (with or without speed pressure), and sentence reading (Fig. 1, fig. S1, and table S1). All tests revealed the same ordering of literacy, from Brazilian illiterates (ILB) to Portuguese ex-illiterates (EXP), Brazilian ex-illiterates (EXB), low-SES Brazilian literates (LB2), Portuguese literates (LP), and Brazilian literates (LB1). We therefore relied on whole-brain linear regressions with reading performance (number of stimuli read per minute) across all groups to identify the brain regions influenced by literacy. Once identified, each brain site was submitted to restricted comparisons of subgroups to evaluate the effects of schooling and literacy with maximal sensitivity (29).

We used three types of whole-brain functional magnetic resonance (fMRI) runs: a "localizer" with horizontal and vertical checkerboards, written and



**Fig. 1.** The six groups of participants and their reading skills. Box plots show (A) the speed and (B) accuracy in reading a list of pseudowords (central horizontal line, median; box, 25th and 75th percentiles; whiskers, minimum and maximum). Additional data on word and sentence reading are provided in fig. S1.

\*To whom correspondence should be addressed. E-mail: stanislas.dehaene@gmail.com

spoken sentences, motor commands, and calculation problems (fig. S2); three visual runs evaluating cortical responses to faces, houses, tools, letter strings, false fonts, and moving checkerboards, while the participant focused on detecting a target star (fig. S3); and four auditory lexical-decision runs with spoken stimuli. To verify compliance, during the localizer, participants either heard or saw short verbal instructions to perform simple calculations or to click the left or right button. With spoken instructions, we observed classical regions for calculation and hand movements, without modulation by literacy, indicating similar comprehension and compliance in all groups. With written instructions, however, activation at the same locations was strongly modulated by reading performance, varying from zero activation in illiterates to a level equivalent to spoken instructions in literates (see fig. S4). While unsurprising, these results validate our group definitions and literacy measure and establish that, with spoken materials, all groups followed instructions quite well. Thus, any subsequent differences cannot be attributed to lower attention or comprehension in illiterates.

**Responses to written sentences enhanced by literacy.** We first examined, in the localizer run, which regions were modulated by reading performance during the viewing of simple sentences consisting of serially presented written words (Fig. 2 and fig. S7). A massive effect was seen in the left ventral occipito-temporal cortex, at classical VWFA coordinates ( $-40, -50, -14, Z = 6.86$ ); with posterior subpeaks ( $-46, -70, -18, Z = 5.39$ ;  $-32, -80, -8, Z = 3.96$ ); and at a right occipital site ( $22, -86, -10, Z = 5.17$ ). These regions were strictly visual, as attested by their lack of activation to spoken sentences. Modulation by reading performance was also seen in a vast left-hemisphere language network, which was also activated by spoken language in all groups: left posterior, middle, and anterior superior temporal sulcus (STS;  $-50, -44, 6, Z = 7.10$ ;  $-54, -12, -12, Z = 5.42$ ); left temporal pole ( $-50, 12, -24, Z = 4.13$ ); left and right premotor cortex ( $-46, -2, 52, Z = 8.50$ ;  $46, 4, 40, Z = 5.48$ ); left inferior frontal gyrus ( $-54, 26, -6, Z = 5.76$ ); and left supplementary motor area ( $-4, 2, 62, Z = 6.33$ ). A significant left-hemispheric asymmetry of this effect was observed in all areas except temporal pole and occipital cortex. Direct comparison of spoken versus written stimuli showed that, in the literate participants, frontal regions became equally activated by spoken versus written language, whereas temporal areas overlapped but still showed a significant difference favoring spoken language (fig. S8).

This analysis thus uncovered three simple effects: with the acquisition of literacy, written materials (i) activate right occipital cortex at the same level as checkerboards; (ii) induce a strong activation in left ventral visual cortex, at the classical site of the visual word form area (VWFA); (iii) gain access to left perisylvian temporal and frontal language areas.

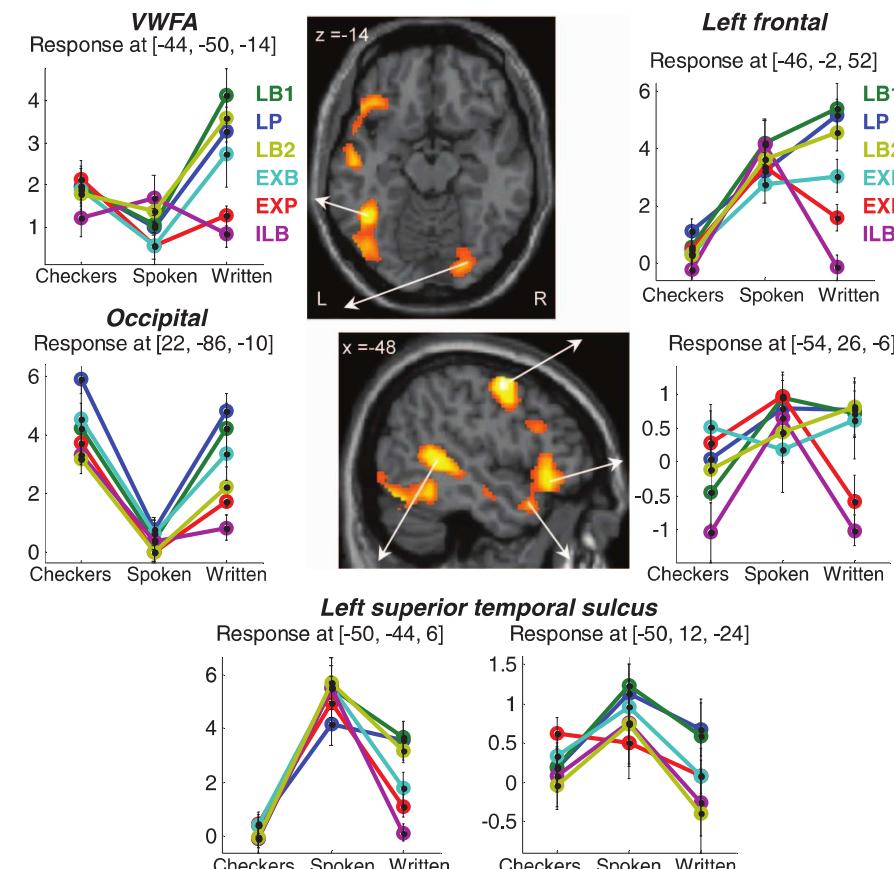
### The visual word form area: A major correlate of literacy.

Our next analyses focused on visual responses in the VWFA. The effect of reading performance on occipito-temporal cortex during sentence reading was replicated when passive viewing of letter strings was contrasted to rest [main peak  $= -46, -80, 4, Z = 5.75$ ; subpeaks at  $-40, -70, -12, Z = 4.50$ ; and the VWFA proper,  $-46, -58, -10, Z = 4.11$ ; right occipital region,  $24, -86, -10, Z = 5.25$ , corrected  $P < 0.05$  by false detection rate (FDR) analysis (29)]. In this part of the experiment, which involved viewing meaningless pseudowords during an easy target-detection task, only these visual regions were modulated by literacy, confirming their role in automatic orthographic coding (16). Notably, the impact of schooling on the VWFA was replicated when the illiterates were compared with the matched low-SES literates (ILB < LB2), both for written sentences versus rest ( $-40, -50, -14, Z = 6.77$ ) and strings versus rest ( $-48, -60, -10, Z = 3.54$ ). The VWFA was also identified when we searched for activation positively correlated with reading performance within the unschooled participants only (illiterates and ex-illiterates; sentences versus rest:  $-42, -54, -6, Z = 6.25$ ; strings

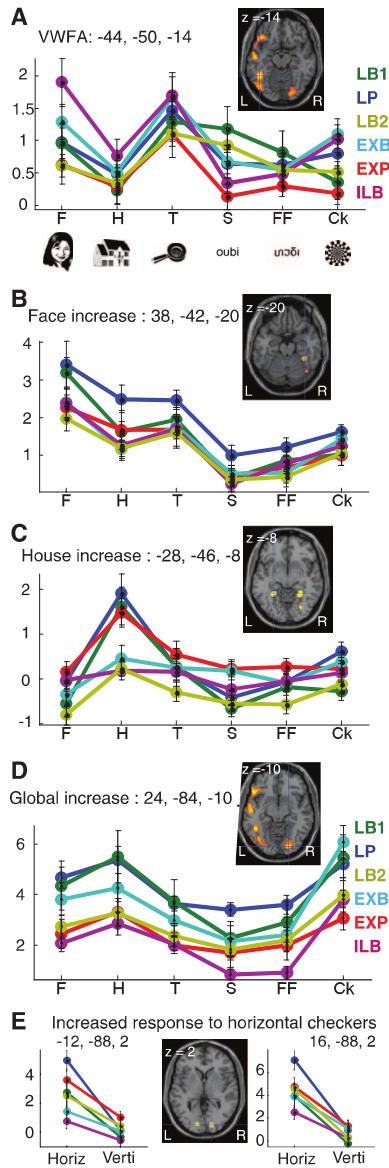
versus rest:  $-48, -56, -6, Z = 3.53$ ). This finding indicates that adult literacy suffices to establish an increased VWFA response to orthographic patterns.

Literacy not only amplified letter string responses, but also increased the cortical selectivity for this category relative to others. When we tested the impact of reading performance on the difference between letter strings and other visual categories, only the VWFA appeared (peak at  $-44, -56, -14, Z = 5.00$ ; subpeak  $-44, -68, -12, Z = 3.85$ ). This effect showed a highly significant hemispheric asymmetry, peaking at the classical VWFA coordinates ( $-44, -56, -12, Z = 5.07$ ). Thus, literacy results in the emergence of a cortical site increasingly more responsive to writing than to other visual categories (17, 30).

Group analyses left open the possibility of a selective but spatially variable response to written strings in every subject. Literacy would then merely displace this response to a reproducible site, without changing its amplitude. This possibility was refuted, however, through an individual analysis in which the voxel most responsive to written sentences versus checkerboards was first identified in each participant, within 10 mm of the group peak (similar results were obtained with 20



**Fig. 2.** Effects of literacy on brain responses to written sentences during the localizer. Axial and sagittal slices show voxels where activation was modulated by literacy during exposure to written sentences relative to rest (voxel  $P < 0.001$ , cluster  $P < 0.05$  corrected). Colored labels refer to participant groups and are ordered according to reading performance (see Fig. 1). Plots report activation to visual checkers, spoken and written language relative to rest in the localizer run, in arbitrary units (mean  $\pm 1$  SE). To avoid circularity, we generated plots solely from the spoken and written commands data, which were independent from the voxel-selection criterion.



**Fig. 3.** Effects of literacy on visual responses to different categories of stimuli. **(A)** Visual responses in the VWFA. (Inset) Statistical parameter map (SPM) map of modulation by literacy of activation to written sentences in the localizer ( $P < 0.001$ , cluster corrected  $P < 0.05$ ). Plot showing activation in the independent visual runs at the isolated peak (mean  $\pm 1$  SE). Activation increased in response to letter strings ( $P = 0.005$ ) and decreased for checkerboards ( $P = 0.013$ ) and, to a lesser extent, for faces (overall  $P = 0.09$ , ILL > LB2,  $P = 0.003$ ). **(B)** and **(C)** SPM maps (voxel  $P < 0.001$  uncorrected) and peak plots showing increases with reading performance of face responses in right anterior fusiform, and of house responses in bilateral parahippocampal regions. **(D)** SPM map of enhancement by literacy of the response to written sentences in lateral occipital cortex (inset,  $P < 0.001$ , cluster corrected  $P < 0.05$ ), and plot showing its replication in response to other visual categories. **(E)** Modulation by literacy of the greater response to horizontal than to vertical checkerboards in primary visual cortex (inset, voxel  $P < 0.001$  uncorrected). In **(B)**, **(C)**, and **(E)**, plots are provided for illustration, because they do not arise from independent data; plots **(A)** and **(D)** are from independent data.

or 40 mm), and then analyzed for its responses to strings and false fonts in the independent visual runs. We observed a significant lateral-to-mesial shift of the word-responsive peak (from  $x = -48$  in illiterates to  $-46$  in ex-illiterates and  $-44$  in literates,  $P = 0.006$ ), but its activation to strings also increased strongly with reading performance (linear regression,  $r^2 = 46.5\%$ ,  $P < 0.0001$ ), as did the selectivity index for strings relative to false fonts ( $P = 0.001$ ). Thus, literacy genuinely increases both the strength and specificity of cortical responses to the learned script in the VWFA.

We also searched for nonmonotonic effects across our six groups, which might arise if the ex-illiterates had to mobilize a broader network than either literates or illiterates in order to read. Indeed, during sentence reading, Brazilian ex-illiterates showed greater activity than Brazilian literates in bilateral mesial fusiform areas ( $-34, -60, 0$ ,  $Z = 5.34$ ;  $38, -50, -2$ ,  $Z = 4.54$ ) and right posterior parietal cortex ( $24, -62, 38$ ,  $Z = 4.70$ ;  $12, -58, 60$ ,  $Z = 4.16$ ) (fig. S5). Thus, to achieve their modest reading performance, ex-illiterates engage a broader and more bilateral ventral network than literates and recruit additional posterior parietal regions associated with serial effortful reading (31). This observation is similar to the developmental finding that reading in young children initially involves a broad bilateral visual network (18) that progressively restricts to the VWFA as greater expertise sets in (19).

**Competition with other visual categories in occipito-temporal cortex.** At the peak coordinates of the VWFA ( $-44, -50, -14$ , identified by the localizer), analysis of the independent visual runs showed a strong response to strings but also to other visual categories, particularly faces and tools (Fig. 3). This finding confirms that this area plays a broad role in visual shape analysis. Reading being a recent invention, we expected that written words would not activate a fully dedicated cortical site but would only partially “recycle” existing cortical mechanisms for visual recognition (2, 23), inducing a cortical competition that would increase with reading expertise. We tested the predicted cortical competition by searching for a decreasing response to visual stimuli with increasing reading performance. At the independently defined VWFA peak, the responses to checkerboards slightly diminished with reading performance, both across all groups (linear regression,  $P = 0.013$ ), for illiterates compared to all other groups ( $P = 0.025$ ), and for illiterates compared to SES-matched literates (ILB > LB2 comparison,  $P = 0.039$ ). For houses and tools, only marginal decreasing trends were found (same three tests,  $P = 0.08$ ,  $0.025$ ,  $0.09$  for houses and  $0.13$ ,  $0.025$ ,  $0.06$  for tools). For faces, the decreasing tendency was stronger: The regression with reading performance across all participants was marginal ( $P = 0.09$ ), but the more focused comparisons were significant (ILB > other groups,  $P = 0.025$ ; ILB > LB2,  $P = 0.003$ ). Comparing illiterates with SES-matched literates indeed arguably provides a purer test, controlling for the pos-

sibility that frequency of exposure to faces might increase with socioeconomic status and influence fusiform responses (32). When studied at the whole-brain level, the ILB > LB2 contrast indicated a highly significant reduction of face response with literacy ( $P < 0.001$ , cluster  $P < 0.05$  corrected) in two bilateral posterior fusiform clusters (right:  $40, -80, 0$ ,  $Z = 5.93$ , with an anterior subpeak,  $38, -50, -12$ ,  $Z = 4.70$ ; left,  $-44, -70, -12$ ,  $Z = 4.58$ , with a subpeak precisely at the VWFA,  $-42, -54, -14$ ,  $Z = 3.91$ ). The same contrast did not reach corrected-level significance for houses or tools.

In summary, at the VWFA site, learning to read competes primarily with the cortical representation of checkers and faces. Further analyses showed that this competition was spatially restricted. We implemented analyses inspired by Golarai *et al.* (28), who showed that cortical peaks with adult-like selectivity to faces and places already exist in 7 to 11 year olds and, with increasing age, progressively expand into the surrounding cortex. For each subject, we first searched for the peak response to faces versus houses within 10 mm of the group coordinates of the VWFA. We then examined an orthogonal regression testing how the activation to faces varied with literacy, at the peak and in increasingly larger annuli of 2, 4, 6, or 8 voxels surrounding it (fig. S6). There was no change in peak face responses with reading performance ( $P = 0.47$ ), nor in annuli of radius 2 or 4, but in the more distant annuli of radius 6 or 8, face activation decreased with reading performance (regression across all groups, respectively  $P = 0.037$  and  $P = 0.015$ ). Similar findings were obtained for the individual peak of responsibility to houses versus faces: no change in peak activation ( $P = 0.20$ ), but a decrease in house-driven activation in the larger annulus of radius 8 ( $P = 0.045$ ). For tools, a category for which no selective region exists in ventral visual cortex (33), we did not find an annular reduction, but a more diffuse reduction in activation with reading performance, significant over both a large sphere of 16 mm ( $P = 0.039$ ) and in the 50 voxels best responsive to tools versus houses ( $P = 0.019$ ), but again not at the peak itself ( $P = 0.27$ ).

Overall, our results indicate that the developmental competition induced by the expansion of orthographic representations in the ventral visual system is modest, does not directly affect the peak responses to faces and houses, but interferes with their expansion into the surrounding cortex. These conclusions fit with previous studies of visual development (28), expertise (24, 25), and plasticity of sensory maps (20), which reveal a displacement of map boundaries due to cortical competition.

**Positive effects of literacy on visual organization.** Competition could also have a positive effect on cortical responses to non-reading-related visual categories: By reducing the dispersion of their neural responses, it might force them to a more consistent cortical site. Indeed, a whole-brain search revealed positive correlations of reading performance with face and house responses in ventral occipito-temporal cortex (Fig. 3). Reading

performance modulated positively the face-versus-rest contrast in the right anterior fusiform gyrus ( $38, -42, -20, Z = 4.84$ , FDR) and induced a significant right-hemispheric shift of face responses in occipito-temporal cortex ( $24, -88, -10, Z = 8.02$ ;  $36, -62, -12, Z = 6.72$ ; and  $38, -40, -22, Z = 4.77$ , FDR). Similarly, reading performance modulated the house-versus-rest contrast in bilateral mesial fusiform and parahippocampal regions (peaks at  $34, -58, -12, Z = 5.19$ ;  $24, -36, -16, Z = 4.83$ ), with a right-hemispheric asymmetry ( $36, -60, -12, Z = 5.53$ ). Altogether, these influences on word, face, and place responses resulted in a better differentiated mosaic of category-specific regions in ventral visual cortex in literates (Fig. 4). Notably, however, face and house increases were found neither when we compared illiterates with their SES-matched literate group (ILB < LB2 comparison), nor when we tested for the effect of literacy in nonschooled participants only (table S2). Plots showed that these effects differentiated the participants living primarily in urban areas (LB1, LP, and to a lesser extent, EXP) versus those living in rural areas (ILB, EXB, and LB2), regardless of their schooling and reading scores (Fig. 3). Although these observations suggest an influence of familiarity rather than literacy or schooling per se, they are nevertheless important in showing how ventral fusiform organization can be affected by cultural variables (1).

Literacy led to another effect: a general enhancement of occipital responses. We probed the right occipital location identified as being modulated by reading performance during written sentences versus rest in the localizer run (coordinates  $22, -86, -10$ ). During the independent visual runs, the activation of this region to every visual category correlated positively with reading scores, with the lowest correlation achieved with the checkerboards ( $r^2 = 0.08, P = 0.02$ ; all other categories,  $r^2$  ranging from 0.17 to 0.22,  $P < 0.0007$ ). Furthermore, these effects were genuinely related to literacy, not just schooling (table S2). When extended to a whole-brain search, with a main contrast for increasing activation to all visual categories, this effect was significant not only in right occipital ( $24, -84, -10, Z = 14.6$ ) but also in left occipital cortex ( $-48, -80, -4, Z = 9.35$ ) and a right occipito-parietal cluster ( $24, -76, 36, Z = 6.75$ ), always with significant right-hemispheric asymmetry. Thus, literacy enhanced occipital responses to essentially all the contrasted black-and-white visual stimuli used in our study.

We also examined whether early retinotopic responses were affected. The localizer comprised horizontal and vertical checkerboards, designed to isolate the meridians of early visual maps. In the Roman alphabet, words appear as horizontally extended strings, and expert readers show enhanced behavioral processing of letter strings presented at the familiar foveal and horizontal location (31, 34). We therefore predicted that literacy might increase the responses to horizontal relative to vertical checkerboards. Indeed, this effect was observed at two symmetrical occipital

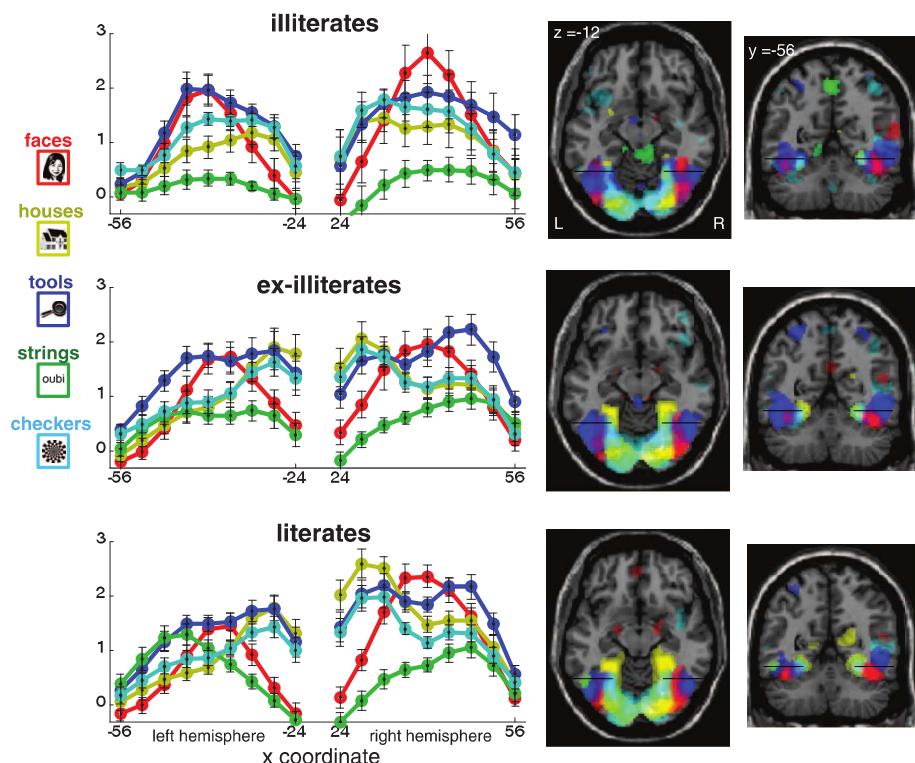
sites corresponding to primary visual cortex ( $16, -88, 2, Z = 5.10$ ; and  $-12, -88, 2, Z = 4.75$ , FDR). These sites exhibited a strong response to horizontal, but not vertical checkerboards, and the modulation by reading performance was seen only with horizontal checkerboards (Fig. 3). This effect was significantly stronger in left than in right V1 (asymmetry effect for horizontal > vertical checkerboards, peak at  $-4, -88, -4, Z = 5.37$ , FDR). Both occipital sites also showed a positive correlation with literacy when written sentences were presented (table S2). Overall, these results suggest that literacy results in a form of perceptual learning (20–22) that refines the earliest stage of cortical visual processing. At this stage, learning is generic enough to generalize to checkerboard stimuli presented at the trained location. The greater effect in left area V1 fits with the larger letter-identification span in the right visual field in left-to-right readers (35).

#### Enhanced responses to spoken language.

Finally, we examined how literacy affected spoken language processing (Fig. 5). Several regions showed a decreasing activation to spoken sentences with greater reading performance: left posterior STS ( $-44, -52, 18, Z = 5.45$ ), left and right middle temporal gyri ( $-66, -22, -10, Z = 5.25$ ;  $48, -30, -8, Z = 5.34$ ), and midline anterior cingulate cortex ( $4, 42, 42, Z = 4.11$ ). These reductions

probably reflect a facilitation of speech comprehension in literate participants (8). In the converse direction, however, activation to spoken sentences essentially doubled from illiterates to literates in left and right superior temporal regions just posterior to Heschl's gyrus (planum temporale;  $-38, -28, 18, Z = 5.52$ ;  $42, -14, 16, Z = 5.43$ ), with bilateral subpeaks near Heschl's gyrus ( $-60, -14, 10, Z = 4.28$ ;  $66, -2, 24, Z = 4.41$ ) and a significant left-hemispheric asymmetry. The effect was replicated in the independent auditory lexical decision runs, with both words and pseudowords (correlations with reading performance:  $r^2 = 0.20, P = 0.0002$ ; and  $r^2 = 0.18, P = 0.0005$ ). The enhanced temporal response was restricted to spoken language, with no trace of activation to written sentences at this site.

The planum temporale is involved in phonological coding of speech (36) and is sensitive to the congruity between a speech sound and a simultaneous visually presented letter (37), an effect that is reduced or absent in dyslexic subjects (38). Our results make this region a prime candidate for the enhanced phonemic processing that accompanies reading acquisition [(10–12); see also (39)]. They also suggest that the reduced planum temporale activation seen in dyslexic children, rather than being a cause of dyslexia (38), could be a consequence of abnormal reading acquisition.



**Fig. 4.** Mosaic of preferences for different visual categories in ventral visual cortex. Slices at right show the activation difference between a given category and all the others [for greater comparability between groups with different numbers of subjects, the figure does not show statistical  $t$  maps, but blood oxygen level-dependent (BOLD) signal maps arbitrarily thresholded at 0.66% of the mean BOLD signal over the whole brain; similar results were seen with  $t$  maps]. Graphs at left show the evolution of the signal relative to rest for the different categories (mean  $\pm 1$  SE), at successive cortical sites tracing a horizontal line through the classical coordinates of the VWFA ( $-42, -57, -12$ ; dotted line).

During auditory lexical decision, but not sentence listening, a second site in left inferior temporal cortex also increased its activation as a function of reading performance ( $-48, -52, -8$ ,  $Z = 8.62$ ). This site showed no activation in illiterates, but a strong one in all literate groups (Fig. 5). Its coordinates strongly suggest a top-down activation of the VWFA and the neighboring lateral inferior temporal cortex (40). Indeed, its activation to spoken words and pseudowords was positively correlated to its activation by written strings in the independent visual runs ( $r = +0.46$ ; no such correlation was found with other visual categories). Overlap with the VWFA was also established by first identifying the peak response to written sentences versus checkerboards in each participant, and then correlating its activation during spoken lexical decision with the participant's reading performance ( $P = 0.005$ ). Altogether, those results confirm that the VWFA can be activated in a top-down manner during speech processing (41–43), even in a lexical decision task that does not require orthographic processing. Because this activation is present only inasmuch as the participants can read, our findings suggest that it reflects the recruitment of

an orthographic code rather than a generic picture code (44).

Previous psycholinguistic research has demonstrated that orthography affects spoken language processing (11–14), but it remains debated whether an orthographic code is activated online whenever we hear a spoken word, or whether orthography merely changes the nature of phonological representations (12). Our results show that both phenomena coexist: The planum temporale increase suggests enhanced phonological coding, compatible with a recent study using low-resolution electroencephalography (12), whereas the VWFA activation indicates an additional and optional orthographic recruitment.

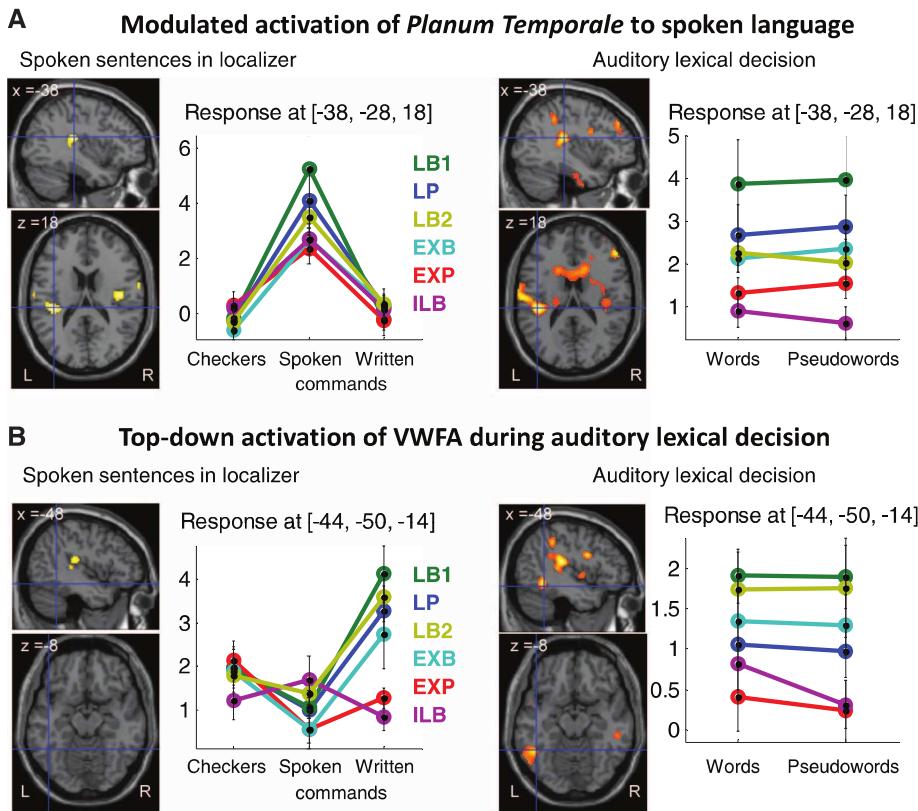
**Effects of early schooling and late literacy.** The above fMRI findings are based on global correlations of brain activation with reading performance, and therefore reflect the joint influences of schooling and literacy. To separate these variables, we performed additional regression analyses on all previously identified peaks (29). One analysis evaluated the impact of literacy acquired during adulthood by testing the effect of reading performance within unschooled subjects only. Another analysis, conversely, probed the impact

of early schooling by regressing out the effect of reading performance and testing for a remaining difference between the Brazilian ex-illiterates (EXB) and the low-SES Brazilian literates (LB2 group), who only differed in early schooling.

The results were clear-cut. Essentially all of the above effects of literacy were present in ex-illiterates who learned to read during adulthood (table S2). Such was the case for the increased VWFA response to letter strings; the capacity to activate the spoken language network through reading (except in left temporal pole); the general visual increase in right occipital cortex; the greater response of area V1 to horizontal checkerboards and written sentences; and the enhanced planum temporale and top-down VWFA activation to spoken words and pseudowords. Thus, the neural modifications induced by adult literacy education were considerable. Furthermore, the vast majority were unaffected by early schooling (table S2). There were only two interesting exceptions. The first was the reduced activation to faces in the VWFA, which was indeed particularly prominent in the LB2 group, who benefited from early schooling, relative to the EXB group. This finding suggests that competitive interactions between written words and faces in ventral visual cortex primarily occur when reading is acquired in childhood, a time when visual maps are known to be highly malleable (28). The other effect of early schooling concerned a marginal left premotor increase in activation to written sentences. This region overlaps with Exner's writing center and is thought to code handwriting gestures (45). Whereas early-schooled participants were fluent in handwriting, it is possible that the ex-illiterates did not receive enough training to automatically activate a gesture code from the mere vision of written sentences.

We caution that these conclusions may only be valid for the moderate level of reading fluency achieved by our ex-illiterate participants. Whether early-schooling effects truly reflect a limit on adult sensory plasticity or would vanish with more intense reading practice remains an open question. However, our results also indicate that, in literates, most of the observed effects do not change further as reading expertise increases (table S2; the only exceptions were increases in planum temporale and left pSTS, and reduced VWFA activation to checkerboards). In particular, the VWFA activation to words and strings increases briskly from illiterates to ex-illiterates and then reaches a plateau uncorrelated with ultimate proficiency, in agreement with developmental evidence that minimal literacy training suffices to establish it in 6 year olds (18).

**Conclusion.** Literacy, whether acquired in childhood or through adult classes, enhances brain responses in at least three distinct ways. First, it boosts the organization of visual cortices, particularly by inducing an enhanced response to the known script at the VWFA site in left occipito-temporal cortex and by augmenting early visual responses in occipital cortex, in a partially retino-



**Fig. 5. Effects of literacy on brain responses to spoken language.** (A) SPM maps of the effect of literacy on the activation to spoken sentences (left), words and pseudowords (right; voxel  $P < 0.001$ , cluster-size corrected  $P < 0.05$ ). Plots show the effect observed in the left planum temporale: Activation to spoken language, words, and pseudowords was doubled or more after the acquisition of literacy (peak selected using the localizer run, left panel, and replicated in the independent lexical decision runs, right panel). (B) SPM maps of the effect of literacy on activations in ventral occipito-temporal cortex to spoken language. Literacy modulated activation to words and pseudowords during auditory lexical decision (right), but not during mere listening to spoken commands. Plots show the response at the a priori location of the VWFA, as defined by the effect of literacy on written sentences (same location as in Figs. 2 and 3A).

topic manner. Second, literacy allows practically the entire left-hemispheric spoken language network to be activated by written sentences. Thus reading, a late cultural invention, approaches the efficiency of the human species' most evolved communication channel, namely speech. Third, literacy refines spoken language processing by enhancing a phonological region, the planum temporale, and by making an orthographic code available in a top-down manner. These largely positive changes should not hide that literacy, like other forms of expertise, also leads to cortical competition effects (23–26). At the VWFA site, a significantly reduced activation was found for checkerboards and faces. The intriguing possibility that our face perception abilities suffer in proportion to our reading skills will be explored in future research.

#### References and Notes

- J. Henrich, S. J. Heine, A. Norenzayan, *Behav. Brain Sci.* **33**, 61 (2010).
- S. Dehaene, L. Cohen, *Neuron* **56**, 384 (2007).
- A. Castro-Caldas et al., *Eur. J. Neurosci.* **6**, 23 (1999).
- M. Carreiras et al., *Nature* **461**, 983 (2009).
- K. M. Petersson, C. Silva, A. Castro-Caldas, M. Ingvar, A. Reis, *Eur. J. Neurosci.* **26**, 791 (2007).
- G. Li et al., *Hum. Brain Mapp.* **27**, 144 (2006).
- K. M. Petersson, A. Reis, S. Askelöf, A. Castro-Caldas, M. Ingvar, *J. Cogn. Neurosci.* **12**, 364 (2000).
- A. Castro-Caldas, K. M. Petersson, A. Reis, S. Stone-Elander, M. Ingvar, *Brain* **121**, 1053 (1998).
- K. M. Petersson, A. Reis, A. Castro-Caldas, M. Ingvar, *Neuroimage* **10**, 45 (1999).
- J. Morais, P. Bertelson, L. Cary, J. Alegria, *Cognition* **24**, 45 (1986).
- H. Cheung, H. C. Chen, *Lang. Cogn. Process.* **19**, 1 (2004).
- L. Perre, C. Pattamadilok, M. Montant, J. C. Ziegler, *Brain Res.* **1275**, 73 (2009).
- P. Ventura, J. Morais, R. Kolinsky, *Cognition* **105**, 547 (2007).
- J. C. Ziegler, A. Petrova, L. Ferrand, *J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn.* **34**, 643 (2008).
- B. A. Shaywitz et al., *Biol. Psychiatry* **52**, 101 (2002).
- L. Cohen, S. Dehaene, *Neuroimage* **22**, 466 (2004).
- C. I. Baker et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **104**, 9087 (2007).
- S. Brem et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **107**, 7939 (2010).
- U. Maurer et al., *Neuroimage* **33**, 749 (2006).
- D. B. Polley, E. E. Steinberg, M. M. Merzenich, *J. Neurosci.* **26**, 4970 (2006).
- W. Li, V. Piéch, C. D. Gilbert, *Nat. Neurosci.* **7**, 651 (2004).
- M. Sigman et al., *Neuron* **46**, 823 (2005).
- S. Dehaene, *Reading in the Brain* (Penguin Viking, New York, 2009).
- I. Gauthier, T. Curran, K. M. Curby, D. Collins, *Nat. Neurosci.* **6**, 428 (2003).
- A. Harel, S. Gilai-Dotan, R. Malach, S. Bentin, *Cereb. Cortex* **20**, 2304 (2010).
- D. B. Rossion, C. C. Kung, M. J. Tarr, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **101**, 14521 (2004).
- D. J. Bolger, C. A. Perfetti, W. Schneider, *Hum. Brain Mapp.* **25**, 92 (2005).
- G. Golarai et al., *Nat. Neurosci.* **10**, 512 (2007).
- Materials and methods are available as supporting material on *Science Online*.
- R. Gaillard et al., *Neuron* **50**, 191 (2006).
- L. Cohen, S. Dehaene, F. Vinckier, A. Jobert, A. Montavont, *Neuroimage* **40**, 353 (2008).
- E. Eger, S. R. Schweinberger, R. J. Dolan, R. N. Henson, *Neuroimage* **26**, 1128 (2005).
- P. E. Downing, A. W. Chan, M. V. Peelen, C. M. Dodds, N. Kanwisher, *Cereb. Cortex* **16**, 1453 (2006).
- T. A. Nazir, N. Ben-Boutayab, N. Decoppet, A. Deutsch, R. Frost, *Brain Lang.* **88**, 294 (2004).
- K. Rayner, *Psychol. Bull.* **124**, 372 (1998).
- C. Jacquemot, C. Pallier, D. LeBihan, S. Dehaene, E. Dupoux, *J. Neurosci.* **23**, 9541 (2003).
- N. van Atteveldt, E. Formisano, R. Goebel, L. Blomert, *Neuron* **43**, 271 (2004).
- V. Blau et al., *Brain* **133**, 868 (2010).
- P. E. Turkeltaub, L. Gareau, D. L. Flowers, T. A. Zeffiro, G. F. Eden, *Nat. Neurosci.* **6**, 767 (2003).
- L. Cohen, A. Jobert, D. Le Bihan, S. Dehaene, *Neuroimage* **23**, 1256 (2004).
- Y. N. Yoncheva, J. D. Zevin, U. Maurer, B. D. McCandliss, *Cereb. Cortex* **20**, 622 (2010).
- A. S. Desroches et al., *Brain Res.* **1356**, 73 (2010).
- J. R. Booth et al., *Hum. Brain Mapp.* **19**, 155 (2003).
- F. Kherif, G. Josse, C. J. Price, *Cereb. Cortex* **10.1093/cercor/bhq063** (2010).
- M. Longcamp, J. L. Anton, M. Roth, J. L. Velay, *Neuroimage* **19**, 1492 (2003).
- This work was supported by Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale (INSERM), Commissariat à l'Energie Atomique (CEA), Collège de France, Agence Nationale de la Recherche (project CORELEX), Fundação para a Ciência e a Tecnologia, the European Community FEDER funding (Project PTDC/PSI/66077/2006, "Cognitive consequences of literacy"), SARAH Network of Rehabilitation Hospitals, and by two grants from the Belgian French community (Fonds de la Recherche Fondamentale Collective 2.4586.07 and Action de Recherche Concertée 06/11-342). We gratefully acknowledge A. Amadon, M.-H. Baju, L. Labruna, D. Le Bihan, L. Hertz-Pannier, P. Pinel, and the NeuroSpin infrastructure groups at NeuroSpin; C. Carvalho, L. Querido, S. Fernandes, and T. Fernandes at the Faculty of Psychology, University of Lisbon; and D. Y. Sugieda, R. S. Vera, A. G. Tauil, E. Amemiya, L. G. N. Nunes, S. B. de Oliveira, and C. L. M. Gillis at SARAH Brasilia.

#### Supporting Online Material

[www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1194140/DC1](http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1194140/DC1)  
Materials and Methods  
SOM Text  
Figs. S1 to S8  
Tables S1 and S2  
References

23 June 2010; accepted 20 October 2010  
Published online 11 November 2010;  
10.1126/science.1194140

(2), could be building blocks for various thermally stable elastic and viscoelastic materials. Aligned, sparse CNT arrays (3), films (4), and sponges packed with short, straight CNTs (5) have shown fatigue resistance, supercompressibility, and compressive elasticity, respectively. Reports of creep and buckling of aligned CNTs (6, 7) demonstrate that a specific assembly of CNTs can show viscoelasticity.

Our strategy to make a viscoelastic CNT material was to assemble traversing long CNTs with a very high density of intermittent physical interconnections, analogous to an aggregate of hair. We made a CNT network where each CNT made contacts with numerous other CNTs. A combination of reactive ion etching (RIE) to the catalyst film, water-assisted chemical vapor deposition (8), and compression was used for the

## REPORTS

# Carbon Nanotubes with Temperature-Invariant Viscoelasticity from $-196^{\circ}$ to $1000^{\circ}\text{C}$

Ming Xu,<sup>1</sup> Don N. Futaba,<sup>1\*</sup> Takeo Yamada,<sup>1</sup> Motoo Yumura,<sup>1</sup> Kenji Hata<sup>1,2\*</sup>

Viscoelasticity describes the ability of a material to possess both elasticity and viscosity. Viscoelastic materials, such as rubbers, possess a limited operational temperature range (for example, for silicone rubber it is  $-55^{\circ}$  to  $300^{\circ}\text{C}$ ), above which the material breaks down and below which the material undergoes a glass transition and hardens. We created a viscoelastic material composed from a random network of long interconnected carbon nanotubes that exhibited an operational temperature range from  $-196^{\circ}$  to  $1000^{\circ}\text{C}$ . The storage and loss moduli, frequency stability, reversible deformation level, and fatigue resistance were invariant from  $-140^{\circ}$  to  $600^{\circ}\text{C}$ . We interpret that the thermal stability stems from energy dissipation through the zipping and unzipping of carbon nanotubes at contacts.

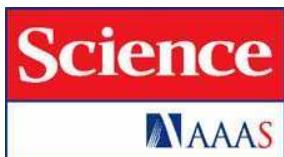
**V**iscoelasticity describes the ability of a material to both dissipate energy (viscous) and reversibly deform (elastic) and permeates all levels of our lives from human tissues, shoe soles, ear plugs, and mattresses to vibration isolators. Viscoelastic properties of existing ma-

terials, represented by rubbers, are inherently temperature dependent (1). This is because molecular motion that is the origin of viscoelasticity is a thermally activated process.

Carbon nanotubes (CNTs), with their exceptional mechanical properties and thermal stability

<sup>1</sup>Technology Research Association for Single Wall Carbon Nanotubes (TASC) and Nanotube Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba, 305-8565, Japan. <sup>2</sup>Japan Science and Technology Agency (JST), Kawaguchi, 332-0012, Japan.

\*To whom correspondence should be addressed. E-mail: kenji-hata@aist.go.jp (K.H.); d-futaba@aist.go.jp (D.N.F.)



[www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1194140/DC1](http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1194140/DC1)

## Supporting Online Material for

### **How Learning to Read Changes the Cortical Networks for Vision and Language**

Stanislas Dehaene,\* Felipe Pegado, Lucia W. Braga, Paulo Ventura, Gilberto Nunes Filho, Antoinette Jobert, Ghislaine Dehaene-Lambertz, Régine Kolinsky, José Morais, Laurent Cohen

\*To whom correspondence should be addressed. E-mail: stanislas.dehaene@gmail.com

Published 11 November 2010 on *Science* Express  
DOI: 10.1126/science.1194140

#### **This PDF file includes**

- Materials and Methods
- SOM Text
- Figs. S1 to S8
- Tables S1 to S3
- References

**Supplementary materials to**  
**“How learning to read changes the cortical networks for vision and language”**

**Contents:**

I.	Materials and methods .....	2
1)	Terminology .....	2
2)	Definition of groups and participant selection.....	2
3)	Behavioural tests.....	4
4)	Behavioural profiles of the participants.....	5
5)	fMRI data acquisition .....	6
6)	fMRI analyses.....	9
II.	Supplementary results .....	13
1)	Behavioral results during fMRI.....	13
2)	fMRI Activation specific to ex-illiterates .....	14
3)	Regions of interest surrounding individual peaks of responsivity to faces and houses... <td>14</td>	14
4)	fMRI effects of lexicality during the lexical decision task.....	15
III.	Supplementary Figures.....	16
1)	Figure S1. Reading scores in the six groups of participants.....	16
2)	Figure S2. Examples of stimuli used in the localizer run (translated into English) .....	17
3)	Figure S3. Examples of stimuli used in the visual runs.....	17
4)	Figure S4. Brain-imaging evidence of participants’ compliance, comprehension , and literacy.....	18
5)	Figure S5. Activation specific to ex-illiterates during sentence reading.....	19
6)	Figure S6. Analyses of cortical competition induced by literacy at and around the individual peak responses to faces and houses. ....	20
7)	Figure S7. Plots of fMRI responses at a-priori peaks within left-hemispheric perisylvian language areas.....	21
8)	Figure S8. Comparison of activations to written and spoken sentences.....	22
IV.	Supplementary tables .....	23
1)	Table S1. Schooling and behavioral profiles of the six groups of participants .....	23
2)	Table S2. Additional tests performed on peaks identified by the main SPM analysis....	24
V.	References for supplementary materials .....	28

## **I. Materials and methods**

### **1) Terminology**

Throughout this study, the term *literacy* refers specifically to the acquired capacity to read and write. The term *schooling* refers to the broader experience acquired by attending school during childhood, which includes abilities such as literacy, numeracy, mathematics, social skills, executive control, etc. The factors of schooling and literacy are thus nested inside each other, but can be partially uncorrelated because literacy can also be acquired later in life, during adulthood, and therefore without early schooling. We refer to this experience as *late literacy*, and to those who achieved it as *ex-illiterates*. An important question for the present research is whether late literacy can fully mimic the effects of early schooling, or whether early schooling has a unique impact on some brain systems.

It is important to recognize that literacy is neither a one-dimensional, nor an all-or-none variable, as learning to read can have dissociated and graded effects on different tasks such as letter knowledge, rapid naming, phonemic awareness, etc (S1). Here, as a first approximation, we summarize the inter-individual variations in speed and ease of reading by a single measure of *reading performance*, defined as the number of words and pseudowords that could be read accurately per minute (see figure S1).

### **2) Definition of groups and participant selection**

Our aim was to assemble, both in Brazil and in Portugal, three groups of participants: literates, ex-illiterates, and illiterates. Ex-illiterate and illiterate subjects were defined as adults who had received no schooling during childhood, or extremely little. Among this population, ex-illiterates were defined as those who had received a sufficient amount of adult education and informal training to be able to read at least a few simple words, while illiterates were those who were still unable to read even simple words (but could identify some letters). Finally, literate subjects, who had received a normal education to literacy at an early age and were all normal readers, were matched to these groups in age and sex.

All our subjects were fully functional in their daily lives, socially integrated and in good health at the time of the tests. All anatomical MRIs were analyzed by an experienced clinical radiologist in order to rule out brain anomalies. One subject (from the Portugal literate group) presented MRI images compatible with Budd-Chiari syndrome, absolutely asymptomatic.

Portuguese subjects were mostly recruited in Portugal, pre-tested behaviorally at the Faculty of Psychology of the University of Lisbon, and flown to the NeuroSpin Center (Saclay, France) for neuroimaging. For simplicity, seven literate Portuguese subjects were also recruited in the greater Paris area through announcements on the radio and on internet sites dedicated to the Portuguese community. The Portuguese ex-illiterates were recruited through Portuguese governmental agencies. Brazilian illiterate and ex-illiterate subjects were recruited in the greater Brasilia area, either through community searches or through adult literacy courses. They were pre-tested at local community schools or at home and underwent neuroimaging scans at the Brasilia unit of the SARAH Network of Neurorehabilitation Hospitals. The literate Brazilian subjects constituted 2 groups: one recruited from the illiterate community (family or neighbors), matched to some extent on socio-economic and cultural characteristics; and another, consisting of college-graduate professionals from the SARAH Network.

Efforts were made to standardize data collection in Portugal, France and Brazil, using the same subject instructions, assessment criteria, fMRI and ERP equipment, MR sequences, and analysis scripts.

Participants tested in France received 80 Euros for their participation, and those flying from Portugal were housed for 3 nights and invited to a one-day tourist visit of Paris. Since Brazilian legislation does not permit remunerating participants of scientific studies, allowing only for reimbursement of related expenses, volunteers tested in Brasília were given food items equivalent to one day's work. All participants were motivated by the study itself and will be shown the results of the research when it is published.

A total of sixty-three subjects (41 from Brazil and 22 from Portugal and France) participated in the study. Six groups were formed according to the participant's literacy status and place of origin (Brazil or Portugal). Table S1 lists their characteristics. All subjects were right-handed (Edinburgh inventory), had normal or corrected-to-normal visual acuity (Snellen or Jagger chart), normal audition, and reported no neurological diseases. All participants gave their written informed consent (the consent form was read aloud and explained to illiterates). Clinical examination ensured that all subjects did not have any counter-indication to MRI scanning.

**Illiterates.** The illiterate participants ( $n=10$ ) were from rural areas (5 subjects) or urban centers in the Brasilia vicinity. Participants were illiterates for social reasons, with no history of special difficulty other than lack of access to schools. The families of all these participants were originally from rural areas, and their parents had been illiterate rural workers. The average age of the illiterates was 53.3. Between 44 and 48 years ago, according to estimates in Brazilian records, the rate of illiteracy was 39.6% of the total population and was particularly prevalent in rural areas. There were almost no accessible schools in these communities, nor public transportation to bring children from these removed regions to areas with schools. As a result, most of the participants in our illiterates group did not attend school at all as children, and only two attended it very inconsistently, starting at 10 years of age (either once a week, or only 2 months a year for a number of years). One was able to identify 15 letters and the other, 16, but they were unable to read words or pseudowords. A few illiterates later reported attending adult alphabetization classes but only for a few months and with insufficient focus to impact on literacy (e.g. the maximum reported was 3.5 years of very inconsistently attended evening classes, but this person still could not read a single word or pseudoword). Four women were housewives, the others were all employed as rural workers, housemaid, street vendor, public servant, or construction worker.

In spite of our efforts, we did not manage to form a group of Portuguese adult illiterates of comparable size. In both Portugal and Brazil, many adults now receive some reading education once they are identified as illiterate by associations or social services. Furthermore, Portuguese participants had to engage in a long series of questionnaires and behavioral tests, pass several behavioral and medical criteria for fMRI (e.g. absence of ferrous metals in the body), and finally accept a three-day trip and a day of examination with unfamiliar fMRI and ERP techniques. These constraints exceedingly reduced the number of Portuguese illiterate subjects willing to participate.

**Ex-illiterates.** The Brazilian ex-illiterates ( $n=10$ ) had backgrounds similar to those of the illiterates (illiterate parents from rural areas), but now lived in suburban settings in greater Brasilia. Like the illiterates, their early education was quite poor: eight had not attended school during childhood, and two attended it for 1 and 3 years, respectively. All had attended adult courses, and their total education was quite variable, ranging from 0.5 to 7 years. However, even those who reported a total education of less than 2 years (6 participants) reached the criterion for reading ability, suggesting they had found enough stimulation for learning to read outside of official courses. Three were housewives, four were construction workers while the others worked as electrician, taxi driver or dressmaker. In Portugal, among the unschooled subjects, we could only recruit ex-illiterate participants ( $n=11$ ). Only one of them attended school in childhood, and in this case only during the first half of the school year. They all attended alphabetization classes for adults (from 1 to 5 years, mean 2.4) for a longer period than Brazilian ex-illiterates did (from 0.8 to 4 years, mean 1.4).

However, compared to these, they displayed lower and more variable reading skills as described below. Five were janitors or maids, two were unemployed, one was retired, the others worked as taxi driver, mason or receptionist.

**Literates.** The Brazilian literates (n=21) were separated into two groups: the LB1 group (n=10) comprised only college graduates (16 years or more of formal education), with a medium to high socio-economic status, while the LB2 group (n=11) comprised participants from the same social community as the illiterate group, but with 2 to 7 years of early education. Thus, while the LB1 group included two systems analysts, two psychologists, two nurses, one physician, one architect, one teacher, and one translator, the LB2 group included three construction workers, two maids, one housewife, one rural worker, one watchman, one yardman, one dressmaker, and one unemployed person. The literate Portuguese group (LP, n=11) comprised a mixture of participants from various SES groups: four of them had limited education (5 years of both early and total education) and came from the same social background as the Portuguese ex-illiterates; two had, respectively, 9 and 10 years of both early and total educational, and the remaining five had college-level education and upper background.

**Group matching and potential confounding variables.** When testing participants with distinct, often life-long histories of education, it is difficult to ensure that other social or environmental variables are perfectly matched. However, note that all of the Brazilian participants in the illiterate (ILB), ex-illiterate (EXB) and low-SES literate groups (LB2) belonged to the same social communities and occupational classification (natural resources, construction and maintenance), with an average minimum monthly salary of US\$292 or EU\$230. Thus, restricted comparisons involving these groups are tightly controlled. We cannot fully exclude that literacy led to changes in exposure to faces or houses (e.g. in magazines). However, all of the subjects in the 4 Brazilian groups, including the illiterates, had TVs at home. Watching TV is a common habit of all households in Brazil, irrespective of socio-economic status. Furthermore, previous studies have demonstrated that illiterates typically have normal scores in basic-level object naming and do not differ from ex-illiterates in a variety of psychophysical tests. On a part-verification task, as long as enantiomorphy (left-right discrimination) is avoided, there is a large effect of schooling but no effect of literacy (S2, S3). Similarly, in the domain of cognitive styles, the Frame-Line Test revealed a large effect of culture (Thailand vs Portugal) and schooling in the Western world, but not of literacy (S4). As regards general cognitive abilities, the mini-mental state examination (MMSE), once discarding the two items that examine reading and writing abilities, typically reveals no difference between illiterates and ex-illiterates, but only between illiterates and schooled literates (S3).

### 3) Behavioural tests

Prior to imaging, all participants underwent a battery of simple neuropsychological tests, in order to verify their reading skills (see table S1). In the letter identification task, the participants were asked to name the 23 printed letters of the Latin alphabet commonly used in the Portuguese language. The word reading task comprised 36 words (12 simple, 12 complex and 12 irregular) to be read aloud. For pseudoword reading, 8 simple and 8 complex pseudowords were created by changing the first phoneme of real words (e.g. "tavaló" instead of "cavalo", which means 'horse' in Portuguese). The sentence reading task was a validated Portuguese version of the "Lobrot" test (S5), which comprises 36 sentences that must be completed by one word, chosen among 5 options, in 5 min or less. In reading fluency tasks, the participants were given one minute to read, as fast as possible, a list of printed words or, separately, of pseudowords. The lexical decision task consisted

of an audio presentation of pseudowords and real words (recorded in separate Portuguese and Brazilian versions), and the participants were asked to press one button for real words and another one for pseudowords (again created by changing the first phoneme of the corresponding real word). Prior to this task, we conducted an elementary button press test to ensure that all participants were able to correctly press the right and left buttons; this was particularly important with the illiterates and ex-illiterates, who were not very familiar with this testing situation. Finally, we also included a picture naming task with simple line drawings to be named, which all participants completed accurately.

#### 4) Behavioural profiles of the participants

Figure S1 shows a boxplot of five distinct behavioral measures of reading performance for the six groups of participants, demonstrating graphically that (1) all but the illiterate subjects could decipher words and pseudowords, albeit with great variability in the two ex-illiterate groups, (2) reading speed systematically differentiated the six groups according to a fixed order.

Table S1 reports the behavioral profile of the six groups (mean, SD, range of performance in each task). The following results are noteworthy:

**Illiterates.** Most of the subjects in the illiterate group had difficulties recognizing even single letters, and none could read simple words or pseudowords.

**Ex-illiterates.** Ex-illiterates identified virtually all single letters, and many were very good at reading simple words. Performance deteriorated, however, when they were asked to read words with complex graphemes, irregular words, or pseudowords. Reading speed was also quite slow for ex-illiterates, as evidenced by the pseudoword and word reading fluency tasks. In a sentence-level reading test (Lobrot), this group was also clearly worse than literates. Furthermore, as a group, ex-illiterates were characterized by a great degree of inter-individual variability, with some participants reading quite accurately, albeit always slowly, while others struggled with even elementary-level reading. Unexpectedly, ex-illiterates from Brazil had better reading performances compared to ex-illiterates from Portugal: for example, the mean number of words read in one minute was about 30 and 15, respectively. In this test, there was no overlap in the distribution of the Brazilian ex-illiterates and the Brazilian literate LB1 group (all the subjects of this group read more than 100 words), but some Brazilian ex-illiterates read more words than the worst LB2 participant. Among the Portuguese, all ex-illiterates read fewer words in a minute than the worst literate participant.

**Literates.** As expected, reading performance was good in most literate participants, and excellent in some. Nevertheless, the three groups differed. In the Portuguese literate group (LP), the mean number of words read in a minute was 95, better than the Brazilian LB2 group mean (69) but poorer than the LB1's (128). More than half (7) of the Portuguese literate participants had worst scores than the worst LB1 participant, and some (4) LB2 participants scored below the level of the worst LP subject.

It may seem surprising that the literate subjects made occasional errors in letter naming, but the test consisted of lower case Arial letters, whose streamlined geometrical shape occasionally induced confusions (mostly consisting in naming the lower-case letter l (l) as “i”, which can barely be considered erroneous).

There was only a very slight age difference between groups ( $F(5,57) = 2.57$ ,  $p = 0.04$ ). However, there was no age difference between the LB2 and illiterate groups ( $p= 0.46$ ) or between the EXB and illiterate groups ( $p=0.33$ ), which provided a suitable direct comparison between these SES matched groups.

## *5) fMRI data acquisition*

We used identical 3-Tesla whole body system (Siemens Trio, Germany) in both testing sites. Identical sequences were used for fMRI: gradient-echo planar imaging sequence sensitive to brain oxygen-level dependent (BOLD) contrast (40 contiguous axial slices, 3 mm thickness; TR=2400 ms; Flip angle = 81°, TE = 30 ms, in-plane resolution = 3 x 3 mm, matrix = 64 x 64). The number of repetitions varied with each experiment and appears below. Two dummy scans were automatically added at the beginning of each run and discarded from data analysis.

At both testing sites, auditory stimuli were presented via high-fidelity stereo headphones (MR Confon). At Neurospin (France), visual stimuli were projected onto a translucent screen, 640 pixels wide (VGA mode), subtending 42.5 cm width and viewed through a mirror from a distance of 125 cm, for an overall angular size of 19.3 degrees. At the SARAH hospital (Brasilia), an MR compatible LCD screen (12 x 17 cm) was used to present visual stimuli. The image on the screen was seen after reflecting on two mirrors, with a global visual angle of 17.3 degrees.

Participants were trained on all tasks inside a mock scanner before starting real data acquisition. A post-acquisition debriefing served to ensure that the subject correctly understood and performed the tasks.

### **Localizer scan**

The localizer, originally designed by Philippe Pinel, has been described in detail elsewhere (S6-8), and was translated to both European and Brazilian Portuguese. Briefly, this short fMRI scan was primarily designed to isolate, in a reliable and individual manner, the brain correlates of early vision, left- and right-hand motor commands, sentence reading, speech listening and mental calculation. Ten different types of stimuli were presented in random order, at a rhythm of approximately one every 4.8 s (see figure S2 for examples). Twenty flashing checkerboard sectors were displayed to identify retinotopic areas. They comprised 10 horizontal and 10 vertical angular sectors of ±25 degrees on each side of the vertical or horizontal meridian, and extended up to an eccentricity of ±10.9 degrees on each side of fixation, reversing contrast every 200 ms. Twenty rest periods (black screen) served as null events for better hemodynamic deconvolution. The rest of the stimuli comprised 20 short meaningful sentences (e.g. “One can easily find a taxi in Paris”), 20 verbal commands to click the right or the left button, and twenty simple one-digit subtraction problems (a task selected to ensure a strong activation of the various components of the number processing system, see ref. (S9)). In each of these categories, 10 stimuli were presented auditorily, as spoken sentences (1.2-1.7 s long), while 10 were presented visually through rapid serial visual presentation (four successive screens of 1-3 words and 250 ms duration, separated by 100 ms intervals). Naturally, the illiterate subjects were not expected to perform the tasks with written materials. We reasoned that this would offer a direct fMRI assessment of their lack of reading skills. With spoken input, we anticipated observing standard language comprehension and calculation networks that could be compared across literate, ex-illiterates and illiterate subjects.

To ensure good comprehension, stimulus presentation was slowed down from the original localizer scan (approximately one trial every 4.8 s). With 2 initial training trials, there was a total of 102 trials for a total duration of 8 min 11 s (491 s or just under 205 TRs of 2.4 s).

The experimental protocol was organized as a fast event-related paradigm. The 100 trials were presented in a fixed sequence with a stochastic SOA (4200ms, 4500ms, 4800ms, 5100ms or 5400 ms; mean SOA = 4.8 sec) for better deconvolution of the hemodynamic signal. This sequence was optimized for both statistical detection and hemodynamic response estimation using a Matlab script inspired by the genetic algorithm of ref. (S10). An original feature of our procedure was to optimize the sequence according to more than one contrast. Eight contrasts of interest were selected: right vs. left hand response, vertical vs. horizontal checkerboards, auditory stimuli vs. rest, visual stimuli vs. rest, auditory calculations vs. auditory non-numerical stimuli, visual calculations

vs. visual non-numerical stimuli, auditory stimuli vs. visual stimuli and visual stimuli vs. checkerboards.

Inside the MR, prior to the localizer, participants were presented with pre-recorded and computerized instructions which informed them that this part would involve many different tasks: 1) reading the visual sentences (or just looking at them if they were unable to read); 2) listening to the spoken sentences; 3) performing a motor command upon verbal request (e.g., pressing the right button 3 times); 4) silently calculating the answer to a subtraction problem; 5) fixating the central cross at all times and particularly during the flashing checkerboards.

## Visual runs

The main goal of this experiment was to visualize the organization of the ventral visual system in response to five categories of images (faces, houses, tools, letter strings, and false-font strings), plus a control condition (moving checkerboards). These images were presented in short blocks of 12 stimuli (10.5 s), separated by a brief resting period with a fixation point only (3 s).

The five main categories of stimuli were faces, houses, tools, letter strings, and false-font strings, each comprising 24 different items. The stimuli were presented in mini blocks comprising 7 trials from the same category, for a total block duration of 10.5 s. On each trial, whose total duration was 1.5 s, a pair of stimuli from the same category was presented. The first element of the pair was flashed for 200 ms, followed by a 200 ms fixation point, followed by the second element for 500 ms, and finally a 600-ms fixation point.

All stimuli were black on a white background. Faces, houses and tools were highly contrasted gray-level photographs matched for size and overall luminance. They subtended ~160 x 160 pixels or about 4.9 x 4.9 degrees of visual angle in France and 4.3 x 4.3 degrees in Brazil. Faces (11 female, 13 male) were front or slightly lateral views of non-famous people. Tools were common hand-held household objects (e.g. knife, hairdryer) presented in normal orientation. Houses comprised exterior pictures of common houses, apartments and buildings. Letter strings were pseudo-words, four letters long, made of the lower-case letters ‘bdmnpqiu’, and were orthographically legal in Portuguese. A false font was designed in which the pseudo-letters were matched one-to-one in stroke complexity with the letters used in the pseudo-word stimuli. The 24 false font strings were generated by one-to-one replacement of the letters in the pseudo-word strings with the false-font letters. Strings and false-fonts were ~130 pixel wide x 40 pixel high or 4 x 1.2 degrees in France, and 3.5 x 1.1 degrees in Brazil. Finally the circular checkerboard was an expanding circular grid of black-and-white designed to broadly cover the entire region where other stimuli could be presented. It was presented in a constantly expanding motion, starting at size 184 pixels (5.5 degrees in France, 4.9 in Brazil) and ending at 211 pixels for the first checkerboard (duration 200 ms, 6.4 or 5.6 degrees) and 267 pixels for the second checkerboard (duration 500 ms, 8.0 or 7.1 degrees).

During rest and inter-trial intervals, a small fixation cross was constantly presented in order to minimize eye movements. A total of 34 mini blocks were presented during each fMRI run (six of each of the five main categories, plus four of the moving checkerboard condition). With 34 blocks+rest segments of 13.5 s each, the total run duration was 7 min 39 s (this is 459 s or just under 192 TRs of 2.4 s).

Throughout all blocks, the subject’s sole task was to monitor for the presence of an occasional target stimulus (a black star) by clicking a right-hand button. A single target appeared at a random location within half of the mini blocks, in the position of the first stimulus in a pair. This task was chosen for its extreme simplicity, ensuring that there were no differences between participants in their performance level. Indeed, performance was consistently high (see below).

For reference, the visual experiment also included a manipulation of repetition priming, inspired by our earlier work (*S11*), but which yielded no significant results, probably for lack of statistical power, and is therefore not reported in detail here. For each category except checkerboards, across blocks, the relation between the first image (“prime”) and the second image (“target”) of each pair was varied. There was one block with “repeated” trials in which those images were identical. Another block consisted of “mirror” trials in which the prime was the mirror-reversed image of the target by a left-right inversion. Finally, the third block consisted of “different” trials in which the prime and target were unrelated images of the same category. For the latter case, each image was paired with another fixed unrelated image for the entire duration of the experiment. To permit such left-right inversion, the pseudo-words were all mirror-reversible pseudo-words such as “obli/ildo”, written exclusively with the lowercase letter set ‘bdmmpqioú’, and using a slightly modified font where letters were strictly reversible, so that even in mirror image the stimuli still looked like possible pseudo-words.

## Spoken language runs

The main goal of the spoken language runs was to probe the impact of literacy on spoken language processing and, in particular, to replicate and extend previous results by Castro-Caldas and collaborators with auditory lexical decision (*S12*). The participants performed a lexical decision task on single spoken words and pseudowords. They responded by pressing one of two hand-held response keys if the spoken stimulus was a word in Portuguese, and another key if it was a pseudo-word. Forty words and 40 pseudowords had been recorded, separately for European and Brazilian Portuguese, by native speakers (the European Portuguese version had already been used in ref. (*S13*)). The average duration of the stimuli was 660 ms for Brazilian Portuguese and 457 ms for European Portuguese. Within one fMRI run, all 80 stimuli were presented in random order, intermixed with an additional 20 rest trials in which no sound was presented. Each trial lasted 3.2 s and consisted in a short (100 ms) dimming of the fixation point, which served as a warning signal, followed 500 ms later by the presentation of a single word. There was an initial blank duration of 4 s, for a total duration of 5 min 24 s (324 s or exactly 135 TRs of 2.4 s). Each of these runs was repeated 4 times in a different random order, with a random initial assignment of response hands and a switch after two runs.

For reference, this study included a manipulation of orthographic consistency, a factor that has been shown to influence on-line measures of spoken words and pseudo-words (*S13-22*). Consistency was manipulated in the European Portuguese material at the level of the rhyme: consistent words have a rhyme with a unique orthographic transcription, e.g., the ending /um/ is necessarily transcribed as “ume”, as in “lume”, ‘light’; in contrast, the rhyme in inconsistent words can be spelled either with or without a mute vowel “e” (e.g. /el/ can be transcribed as in “pele”, ‘skin’, or in “mel”, ‘honey’), or with different consonants (e.g., /ɔs/ can be transcribed as in “posse”, ‘possession’ or in “coce”, ‘scratch’). Given that the final vowel “e” is not mute in Brazilian Portuguese, in the case of the Brazilian material, consistency was manipulated at the level of the onset of the second syllable: consistent words, like “povo” (‘people’) have a second consonant (/v/) that is always transcribed with the letter “v”; in contrast, in inconsistent words, the intervocalic consonant /s/ can be transcribed as either “ç” (“poço”, ‘well’) or “ss” (“osso”, ‘bone’). For each language, 20 words had consistent orthographies and 20 inconsistent. Given that pseudowords had been constructed by substituting the initial phoneme of each word, the consistency factor was also well defined for pseudo-words.

Unfortunately, we only observed erratic behavioral effects of the consistency factor, with inconsistent results in the two countries, and no fMRI effect. Therefore, these analyses are not

described in detail. Note that previous studies of orthographic consistency, all performed in a standard psychological laboratory, used large numbers of educated participants (e.g. 28 participants in ref. (S13)) and yielded only small effects (28 ms in this particular study). The present results were obtained with a relatively small number of trials, under listening conditions that were compromised by the noise of the fMRI and the hearing-protection devices used, and with relatively slow response times. Any of these complicating factors could explain our failure to obtain an orthographic consistency effect.

## 6) fMRI analyses

Functional images were first corrected for head motion, resampled every 3 mm using sinc interpolation, normalized to the standard MNI brain space, and spatially smoothed with an isotropic Gaussian filter (5 mm full width at half maximum). A two-level analysis was then implemented in SPM5 software (Wellcome Department of Cognitive Neurology, London, UK).

Whole-brain individual analyses. For each participant, consecutive normalized fMRI images were high-pass filtered at 128 s and smoothed with a 4 s Gaussian kernel. The data was then modelled, within each fMRI run, by regressors obtained by convolution of the experimental conditions with the canonical SPM hemodynamic response function and its time derivative. The model for the localizer scan included 10 conditions: horizontal checkers, vertical checkers, and sentences, instructions for left or right button pressing, and arithmetic problems, the latter four conditions being presented either visually or auditorily. For visual runs, 17 conditions were modelled: 15 conditions formed by the factorial product of 5 categories (faces, houses, tools, letter strings, false fonts) x 3 repetition types (same, mirror, different), plus the checkerboard condition and the target star condition. Finally, for spoken lexical decision, 4 conditions were modelled, formed by the 2x2 product of lexicality (word or pseudoword) and consistency (consistent or inconsistent spelling) factors.

Whole-brain group analyses. For each participant and each condition, the above first-level SPM model yielded a beta weight image of activation relative to rest (expressed as a percentage of the whole-brain BOLD signal). All of these images, except the target star condition, were then entered into several second-level whole-brain ANOVAs. The main ANOVA had reading performance as a covariate of interest (average number of words and pseudowords read per minute), ranging from 0 for illiterates to 136 items/minute for our best reader. This analysis was used as the most sensitive measure of the overall impact of literacy, because it relied on the entire set of participants and took into account their variable reading scores (capturing for instance the high variability in reading performance inside the ex-illiterate groups). In another ANOVA we modelled separately the six groups of participants (ILL, EXP, EXB, LB2, LP, LB1), permitting more focused contrasts: ILL<LIT (main effect of literacy, confounded with schooling), ILL<LB2 (effect of literacy, confounded with schooling, but matched for SES), and ILL<EX (effect of literacy acquired in adulthood, unconfounded by schooling or SES). For greater sensitivity of the latter contrast, taking into consideration the variability in reading scores, we also reanalyzed the effect of reading performance restricted to the illiterates and ex-illiterates. For all of these whole-brain analyses, unless otherwise stated, we used a threshold of  $p < 0.001$  uncorrected at the voxel level, and report only regions where such voxels grouped together to form a contiguous cluster whose extent was significant at  $p < 0.05$ , corrected for multiple comparisons across the brain volume. This analysis is appropriate for detecting significant effects with a sufficient cortical extension ( $\sim 150$  contiguous voxels were needed to achieve cluster-extent significance). Occasionally, effects with a smaller

cortical extent but a high peak-voxel Z statistic achieved significance only with the False Detection Rate (FDR) statistic, in which case they are marked by “FDR” in the text.

Asymmetry analyses. For testing inter-hemispheric differences in neural activation, for each contrast and each participant we further created a left-right flipped image by applying to each original contrast image a spatial transformation specific to each participant, appropriate for aligning the flipped anatomical image to the MNI template. We then computed a hemispheric difference image by subtracting the flipped contrast images from the original contrast images. These images of left-right differences were then submitted to the same ANOVA models as above, in order to estimate the hemispheric differences for each effect of interest.

Plots. Once a significant peak was identified, illustrative plots of effects were generated by extracting the beta weight of SPM regressions of individual participants’ data with the hemodynamic functions of the appropriate stimulus categories, and then plotting the mean and standard error of these beta weights in the six groups of participants. These values thus estimate, in arbitrary units, the size of the fMRI activation relative to the implicit rest baseline that separates trials.

#### Additional regressions.

Once SPM analysis identified a significant cortical effect by correlation of activation with reading performance across all groups, we extracted the percent activation in each condition and for each subject, and plotted their distribution in each group (table S2). We also submitted these measures to further analyses, aimed at testing whether the brain changes associated with literacy involve a sensitive period in childhood or, alternatively, can occur in adulthood and depend solely on the literacy level which is eventually attained.

Table S2 reports the results of this detailed analysis. The first two statistics in table 2 are controls probing whether the observed effect can be genuinely attributed to literacy, once other variables are unconfounded.

- *Main impact of reading score, corrected for age and country.* This is a regression analysis testing for a significant impact of literacy (i.e. average reading speed for words and pseudowords), with age and country as additional covariates
- *Impact of schooling within low-SES adults (LB2-ILB).* This is a restricted group comparison between the Brazilian illiterates and the matched group of Brazilian literates with the same social origins and socio-economic level.

The next three statistics attempt to separate the effects of literacy, schooling and eventual expertise:

- *Pure effect of late literacy (rs in EX+IL).* This statistic probed whether the observed brain change occurs when literacy is acquired in adulthood, which is the best situation for controlling for other effects of schooling and socio-economic background. We contrasted the ex-illiterates with the illiterates – two adult populations, both deprived of early schooling, only one of which had the opportunity to acquire reading in adulthood. In order to achieve greater sensitivity and take into account the large variability in the reading scores of the ex-illiterates, we actually tested for the effect of reading score, restricted to the ex-illiterate and illiterate groups (in the latter the reading score is zero by definition). A significant effect indicates that the studied neural system varies specifically with literacy, even when acquired late, and is not just dependent on early schooling.
- *Pure effect of early schooling (LB2-EXB|rs).* This statistic probed the impact of early schooling by comparing the LB2 and EXB groups, who had learned to read, respectively, as children and as adults, but were otherwise from similar social backgrounds. In order to keep eventual literacy level as similar as possible, we focused our analysis on the Brazilian LB2 and EXB subjects, i.e. the schooled versus unschooled subjects whose reading scores were

most comparable (excluding the LP and LB1 groups with high literacy, and the EXP group with low literacy). Because the LB2 and EXB groups still differed slightly in their literacy level, reading performance was introduced as an additional covariate of non-interest. Thus, a significant effect on this test indicates a significant advantage for childhood compared to adult reading acquisition, after adjustment for reading performance.

- *Impact of eventual proficiency within the early schooled (rs in LIT).* This statistic tested whether, in literates, the observed brain change depends on the level of literacy eventually attained. Thus, we restricted the analysis to literate participants and tested a regressor for reading performance. A significant effect indicates that the studied neural system does not solely require a minimal exposure to reading in childhood, but continues to change with increasing literacy level.

Avoiding circularity. Circularity can occur when a cortical peak is selected by one analysis and then further analyzed by additional statistics or plots that are not independent of the original selection criterion (S23, 24). The following steps were taken to avoid these problems.

First, the majority of our inferences were based on classical whole-brain search in SPM5, using a corrected-level cluster-size significance of  $p < 0.05$  after correction for multiple tests at the whole brain level. Such inferences, which merely localize the cortical regions affected by literacy, do not suffer from statistical circularity (see figure 4 in reference 24).

Second, when required, secondary analyses of previously identified voxels were based on data and/or statistical tests that were independent of the initial voxel selection criterion. Our analyses of the VWFA peak (section entitled “Competition with other visual categories in occipito-temporal cortex”) are based on, first, localizing the peak of the group effect of literacy in the localizer runs, then testing it in the independent visual runs. Similarly, in the section entitled “The visual word form area: a major correlate of literacy”, we first isolated the voxel showing the largest difference between written sentences and checkerboards in the localizer, then probed its response during the independent visual runs. For our analyses of the individually defined FFA and its surrounding voxels, we isolated the peak response to faces>houses in each subject, then studied an orthogonal test (the effect of literacy on faces – rest). Finally, for analyses reported in table S2, most inferences are based on fMRI data from conditions independent of those used to identify the cortical peak (cells noted in light gray). For reference, we also report the results of the same statistics ran on the original fMRI data; very little difference was seen, suggesting that voxel selection effects are not prominent in our data set.

Third, even simple data plots can also be affected by a form of circularity, inasmuch as the test used to isolate a voxel introduces a bias towards the selection of voxels in which, by chance alone, noise leans in the direction of the contrast being tested (S24, 25). To sidestep this problem, whenever possible, we plotted the profile of activation at coordinates derived from an independent data set (figures 2, 3A, 3D, and 5). For plots of the localizer runs (figures 2 and 5), we identified peak voxels by correlation of reading performance with the written-sentence activation, then plotted the average activation to all other conditions in which written or spoken sentences were presented (motor commands + calculation problems). For plots of the auditory runs (figure 5), we plotted only peak voxels identified from independent spoken-sentence or written-sentence conditions. A similar approach was adopted for plots of the visual runs (figure 3A and 3D). For faces, houses, and horizontal/vertical checkers, however, independent data were not available, but it still seemed important to visualize the mean activation in regions identified by SPM analysis, particularly to compare it across regions and conditions, while keeping in mind that some but not all of the plots’ features can be affected by circularity. To address this problem, Vul and Kanwisher (S25) suggest “full disclosure”, i.e. that “Authors should explicitly state whether the plot corresponds to the same (non-independent) data used for the selection criteria, or different, independent data.” We adopted

this approach in the present paper, by precisely stating the voxel-selection criteria and by noting the absence of independent data in figures 3BCE.

Vul and Kanwisher (S25) also note that “what would clearly be impressive would be analyzing the data of a second study using the anatomical markers identified in an earlier study (e.g., the Talairach coordinates) and then testing the correlation in that specific region.” To further test the validity of our findings, we implemented this approach by selecting *a priori* the seven peak coordinates reported in the language lateralization study by Pinel et al. (S6), who used an equivalent localizer as in the present study in a large group of French adults. Figure S7 shows the corresponding plots, analogous to those reported in figures 2, 3A and 5B of the main paper. Both the coordinates and the profiles of responses were highly similar to those originally reported by our SPM methods, and regressions with reading performance revealed similar effects (see figure S7), again suggesting that voxel selection effects were minimized in our data set with 63 participants.

## ***II. Supplementary results***

### ***1) Behavioral results during fMRI***

#### ***1. Target detection during the visual runs***

Performance was high and comparable across groups ( $F(5,55) = 0.82$ , n.s.). The mean hit rates  $\pm$  standard deviation were: Portuguese literates,  $97\% \pm 6$ , Brazilian literates 1,  $97\% \pm 5$ , Portuguese ex-illiterates,  $96\% \pm 3$ , Brazilian ex-illiterates,  $95\% \pm 11$ , Brazilian illiterates,  $93\% \pm 5$ , and Brazilian literates 2,  $89\% \pm 14$ . Reaction times were also not different when the groups were compared within each country (Brazilians,  $F(3,35)=0.62$ ,  $p>0.6$ ; Portuguese,  $F(1,19)=1.65$ ,  $p>0.1$ ), though a significant difference existed between the two test sites,  $F(1,60)=154.0$ ,  $p<0.001$ ), presumably due to differences in button hardware or instructions. One subject from the Portuguese ex-illiterate group was excluded from this analysis because of an erratic response pattern during MRI, even if she did perform well during the training session and reported no particular anxiety or other problems during the scan.

#### ***2. Lexical decision during the spoken language runs***

ANOVAs were performed separately for each country for two reasons: first, the stimulus materials were different between countries, and second the number of groups was also different between countries, leading to an incomplete design. ANOVAs were performed separately for RTs and accuracy with lexicality (pseudowords vs. words) as within-subject factors, and group as between-subjects factor.

Portugal: Analyses on RTs revealed only an effect of lexicality ( $F(1, 20)= 23.85$ ,  $p < .001$ ,  $MSe= 9844$ ) with words (1106 ms, standard error [SE] = 29 ms) responded more quickly than pseudowords (1210 ms,  $SE= 35$  ms). Neither the main effect of group, nor the Group x Lexicality interaction were significant.

In the accuracy analysis, there was a significant effect of group ( $F(1,20)= 8.65$ ,  $p < .05$ ,  $MSe = .03$ ), with better overall performance for literates (88% correct) than ex-illiterates (78% correct). The lexicality effect approached significance ( $F(1, 20)= 3.96$ ,  $p = .06$ ,  $MSe= .02$ ), with higher scores for words than pseudowords (87% and 80%, respectively). The interaction lexicality x group which was reported in a previous study (S12) was not significant, but approached conventional levels of significance in the appropriate direction ( $F(1, 20)= 3.03$ ,  $p= .097$ ,  $MSe= .02$ ): whereas for literates the accuracy between words and pseudowords were similar (89% and 88%, respectively,  $F<1$ ), ex-illiterates had marginally more accurate responses for words than pseudowords (84% and 72% correct ( $F(1, 10)=4.16$ ,  $p= .07$ ,  $Mse= .04$ ).

Brazil: Analyses on RTs revealed an effect of lexicality ( $F(1, 37)= 49.86$ ,  $p < .001$ ,  $MSe= 8519$ ), with words responded more quickly than pseudowords (996 ms,  $SE= 21$  ms, versus 1098 ms,  $SE= 25$  ms). Neither the main effect of group, nor the interaction of lexicality with group were significant (both  $Fs < 1$ ). In the analyses on accuracy, there was an effect of group ( $F(3, 37)= 12.08$ ,  $p < .001$ ,  $MSe= .03$ ). The literate LB1 group had the highest performance (93% correct), followed by the literate LB2, ex-illiterates and illiterates (78%, 80% and 71% correct, respectively), with no differences between these three groups. Neither the main effect of lexicality ( $F(1, 37)= 2.78$ ,  $p= .10$ ,  $MSe= .03$ ) nor the interaction lexicality x group were significant ( $F < 1$ ). Accuracy was 83% correct for words and 78% for pseudowords.

## 2) fMRI Activation specific to ex-illiterates

Although we primarily searched for activations monotonically related to reading scores, non-monotonic effects might arise if the ex-illiterates, in order to read, had to mobilize a broader network than either literates or illiterates. To explore this possibility, we used the contrast EXB>ILB during written sentences in the localizer ( $p<0.001$ , cluster-extent  $p<0.05$ , corrected). As shown in figure S5, Brazilian ex-illiterates show more activation than illiterates in a large stretch of bilateral ventral visual cortex including fusiform (-50, -56, -10,  $Z=5.14$ ; 52, -50, -8,  $Z=5.04$ ) and lingual regions (-34, -50, -8,  $Z=4.90$ ; 40, -50, -2,  $Z=5.03$ ), in bilateral posterior parietal cortex (30, -64, 32,  $Z=8.17$ ; -22, -60, 38,  $Z=6.37$ ), intraparietal sulcus (-40, 40, 44,  $Z=5.24$ ; 42, -38, 40,  $Z=5.55$ ) as well as several precentral and prefrontal peaks (e.g. -34, 0, 28,  $Z=5.93$ ; 38, -2, 56,  $Z=5.27$ ). Parts of these regions are unique to ex-illiterates, inasmuch as they activate more in Brazilian ex-illiterates than in Brazilian literates (EXB>LB1&LB2, same threshold). The regions passing the latter test are the bilateral mesial fusiform/parahippocampal areas (-34, -60, 0,  $Z=5.34$ ; 38, -50, -2,  $Z=4.54$ ) and right superior posterior parietal cortex (24, -62, 38,  $Z=4.70$ ; 12, -58, 60,  $Z=4.16$ ). Their localization fits with previous studies of a parieto-ventral network for serial effortful reading (S26). In agreement with this interpretation, their activation was not found in the absence of explicit reading instructions, i.e. during the mere presentation of letter strings forming pseudo-words during the visual runs.

## 3) Regions of interest surrounding individual peaks of responsivity to faces and houses

In addition to classical SPM analyses, we also implemented analyses inspired by a previous study of visual specificity in the course of the development, performed by Golarai et al. (S27). The goal was to examine the cortical peaks of responsivity to houses, faces and tools, taking into account the inter-individual variability in the location of these peaks. Golarai et al. showed that, during development, the peak responses to faces and places already have an adult level of stimulus selectivity in children aged 7-11. Development, however, occurred primarily in the surrounding cortices, as demonstrated by extracting the signal from concentric “shells”, i.e. hollow spheres centered around the subject-specific peaks and characterizing the response at a certain distance from the peak. With age, the selectivity of the response to faces and houses increased in shells surrounding the individual peak response, suggesting a cortical expansion process. We thus wondered whether the putative competitive effects of literacy would occur at the peak or in the surrounding cortex, which, according to Golarai et al., appears to be less determined during development.

Within each subject, we first searched for the peak responsivity for faces>houses (or, in a second analysis, houses>faces). We were primarily interested in the effects happening in the vicinity of the VWFA, hence we searched for this peak within a 10-mm sphere centered on the group coordinates of the peak effect of reading performance on visual sentences (-44, -50, -14). We then extracted the activation to faces (respectively houses) at this peak as well as in increasingly larger shells of 2, 4, 6 or 8 voxel radius surrounding it. We regressed this value against the participants' reading performance scores. A significantly negative regression weight indicated that, with increasing literacy, there was a decrease in activation to faces (resp. houses).

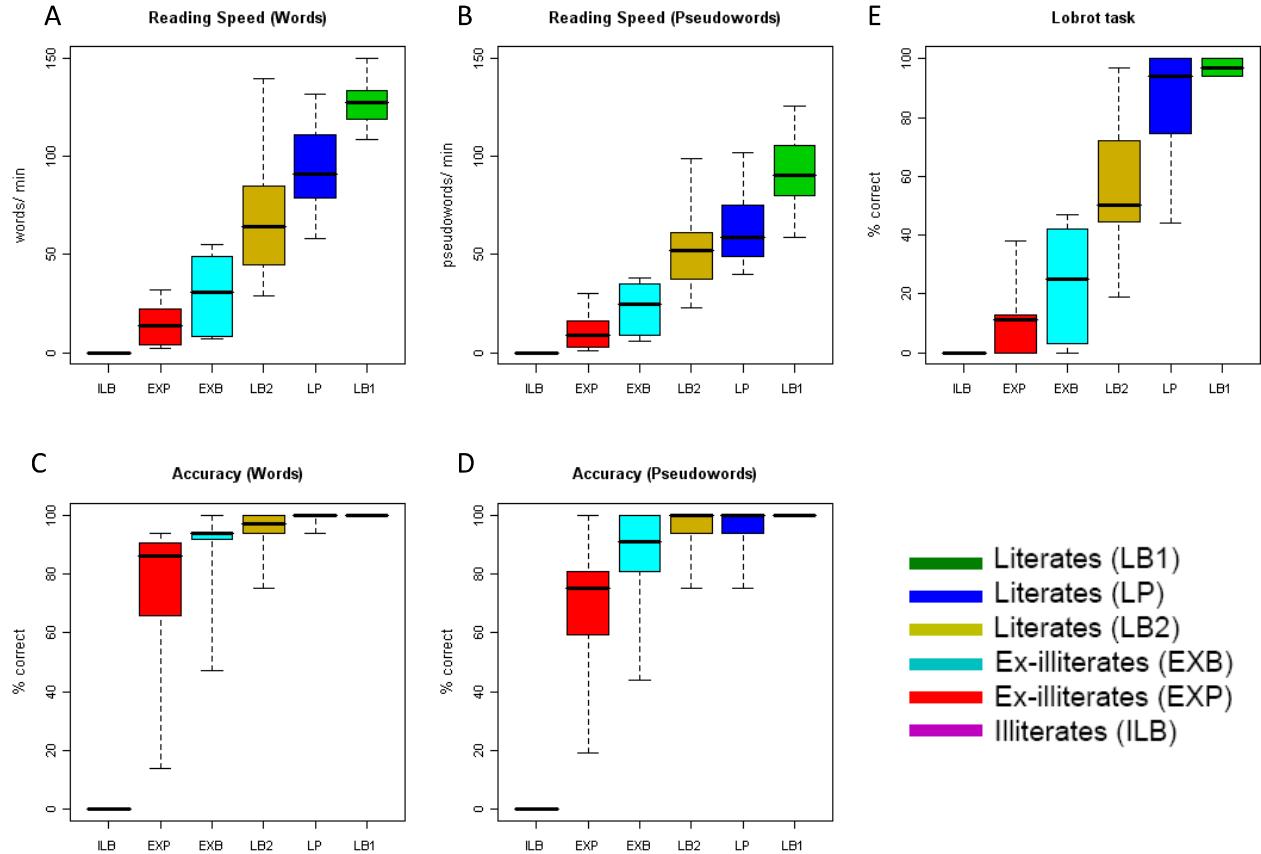
For plotting purposes, we transformed the beta weight of the regression into an estimate of the size of the competition effect, expressed as a percentage of the mean activation within this region, and estimated as minus the slope of the regression of activation by performance, divided by the mean activation across all groups, and multiplied by 100 (given that the reading performance variable ranges from 0 in illiterates to a mean ~100 in the LB1 group). With this measure, a positive effect indicates cortical competition, such that increasing literacy leads to a stronger percentage attenuation of the cortical response to faces (resp. houses).

As shown in figure S6, such a competition effect was not identified at the peak itself, but within concentric shells relatively distant from the peak. Significance ( $p<0.05$ ) was attained at 12 and 16 mm of the peak for faces, and at 16 mm of the peak for houses.

#### *4) fMRI effects of lexicality during the lexical decision task*

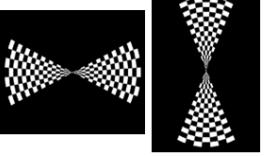
fMRI analyses revealed that there was no significant effect of reading performance on the difference in brain activation to spoken words versus pseudowords. The main effect of lexicality (words > pseudowords) identified a large network comprising the left posterior and anterior middle temporal gyrus (-60, -50, -2, Z=5.30; and -64, -16, -18, Z=4.04), left parieto-temporal junction (-46, -64, -26, Z=4.98, with subpeaks in the inferior parietal region, -34, -78, 38, Z=4.72; and -56, -48, 38, Z=4.06), precuneus (-4, -40, 38, Z=4.64) and mesial ventral prefrontal cortex (-6, 46, 4, Z=4.10). Most of these regions belong to the "default mode" network and, accordingly, the observed difference corresponded to a greater deactivation by pseudowords than by words. The only exception was the left posterior MTG, where activation was mildly positive to spoken words relative to rest, and mildly negative for pseudowords.

### III. Supplementary Figures

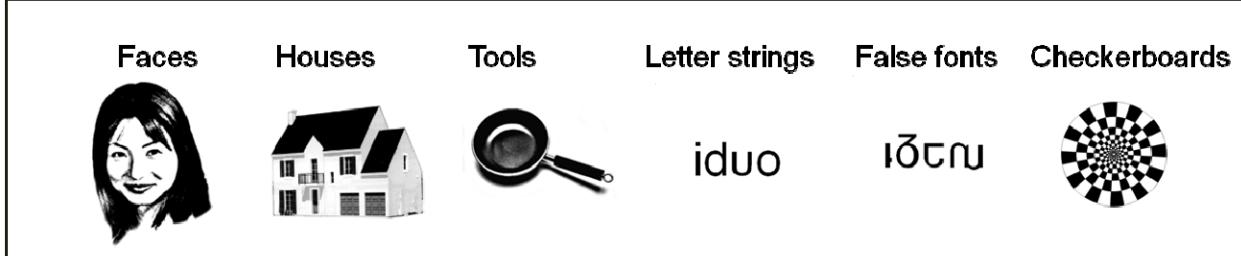


#### 1) Figure S1. Reading scores in the six groups of participants.

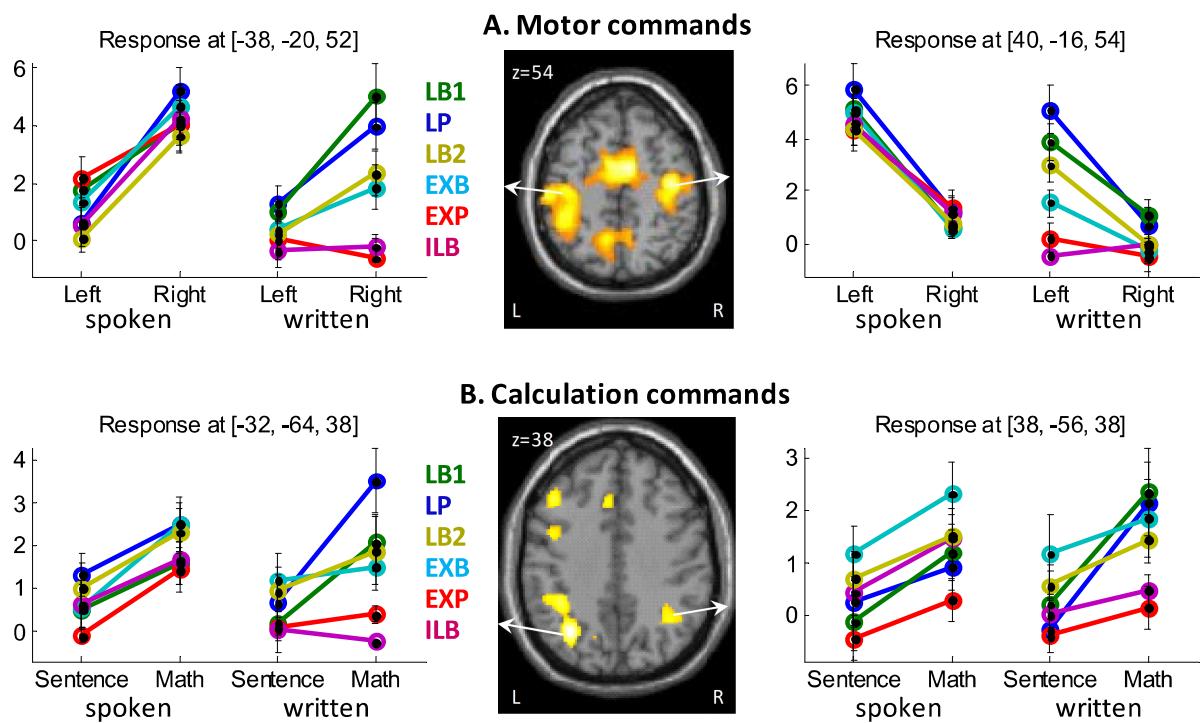
A, B: Speed of reading a list of words (A) and pseudowords (B) (unit = words per minute; central mark = median, box = 25<sup>th</sup> and 75<sup>th</sup> percentiles, whiskers = min and max across participants). C, D, Accuracy in reading isolated words (C) and pseudowords (D) without time constraint. E, sentence reading and comprehension task (Lobrot), comprising 36 sentences that should be completed by one word in 5 min or less.

<b>Visual Stimuli</b>	<u>10 short sentences</u> the river across many bridges There are	<u>10 subtractions</u> four from one Subtract	<u>10 motor instructions</u> button left on the Press	<u>20 Flashing checkerboards</u> 
<b>Audio. Stimuli</b>	<u>10 short sentences</u> “we easily find a taxi in Paris”	<u>10 subtractions</u> “subtract two from five”	<u>10 motor instructions</u> “press the left button”	<i>time</i>

2) Figure S2. Examples of stimuli used in the localizer run (translated into English)

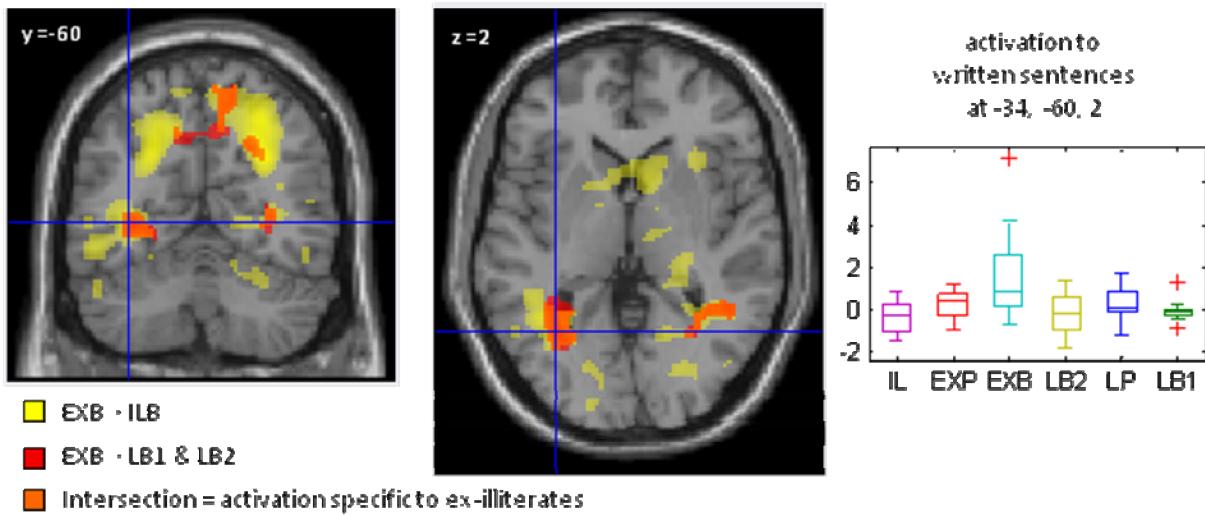


3) Figure S3. Examples of stimuli used in the visual runs



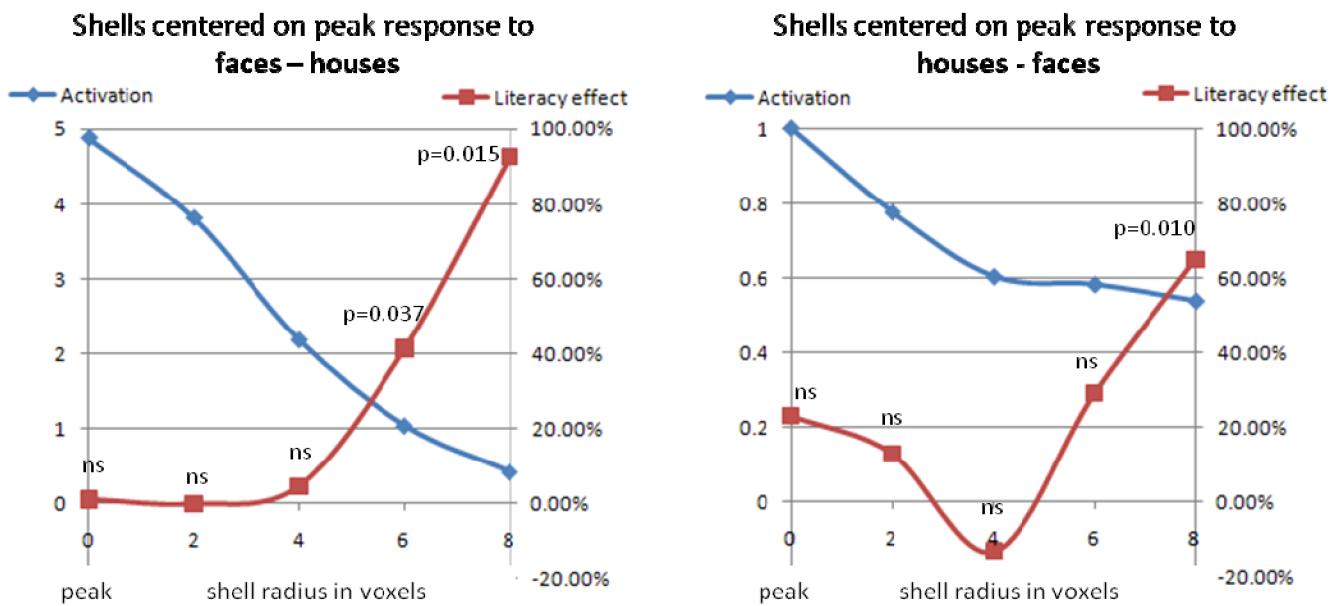
4) Figure S4. Brain-imaging evidence of participants' compliance, comprehension , and literacy.

A, Modulation by literacy of the contrast 'written motor command versus written sentence', showing a classic motor network. Plots indicate activation relative to rest for left versus right-clicking instructions, separately for instructions presented in spoken and written modalities. B, Modulation by literacy of the contrast 'written calculation command versus written sentence', showing a classical calculation network. Plots indicate activation relative to rest for sentence listening versus calculation instructions, separately for instructions presented in spoken and written modalities.



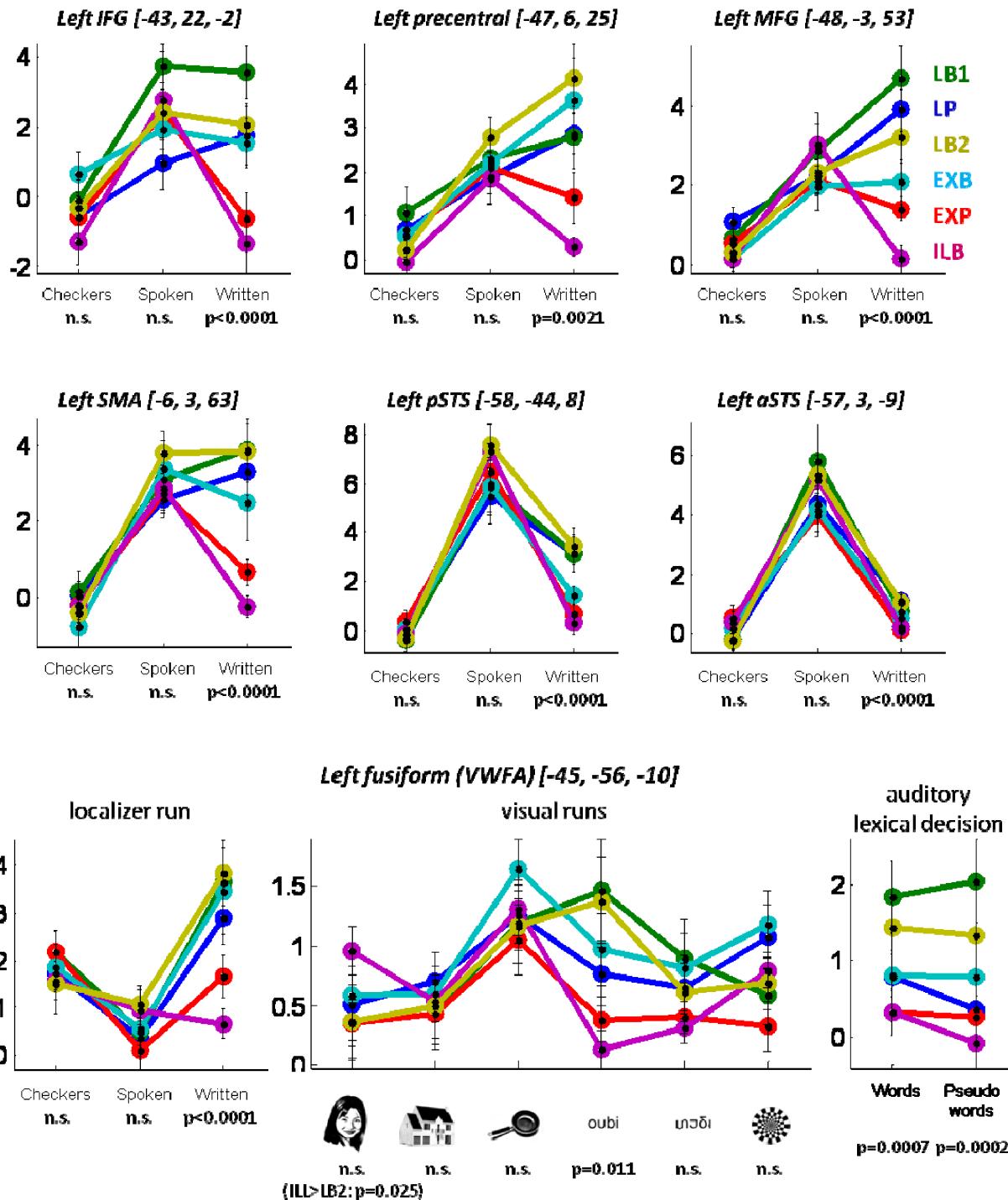
5) Figure S5. Activation specific to ex-illiterates during sentence reading.

Yellow voxels, greater activations to written sentences (localizer runs) in Brazilian ex-illiterates than in illiterates, showing both bilateral mesial fusiform/parahippocampal regions and bilateral posterior parietal cortex (EXB>ILB,  $p<0.001$ , cluster-extent  $p<0.05$ , corrected). Red voxels, greater activations to the same stimuli in Brazilian ex-illiterates than in Brazilian literates (EXB>LB1&LB2, same threshold). The intersection areas, shown in orange, are thus characterized by a non-monotonic pattern of activation in the six groups of participants, as ordered by their mean reading scores (right graph). The plot is a classical box-and-whisker plot showing the range of activations during written sentence processing relative to rest (central mark = median, box = 25<sup>th</sup> and 75<sup>th</sup> percentiles, whiskers = min and max of non-outliers, crosses = outliers, defined as lying outside 1.5 times the 25<sup>th</sup>-to-75<sup>th</sup> percentile range).



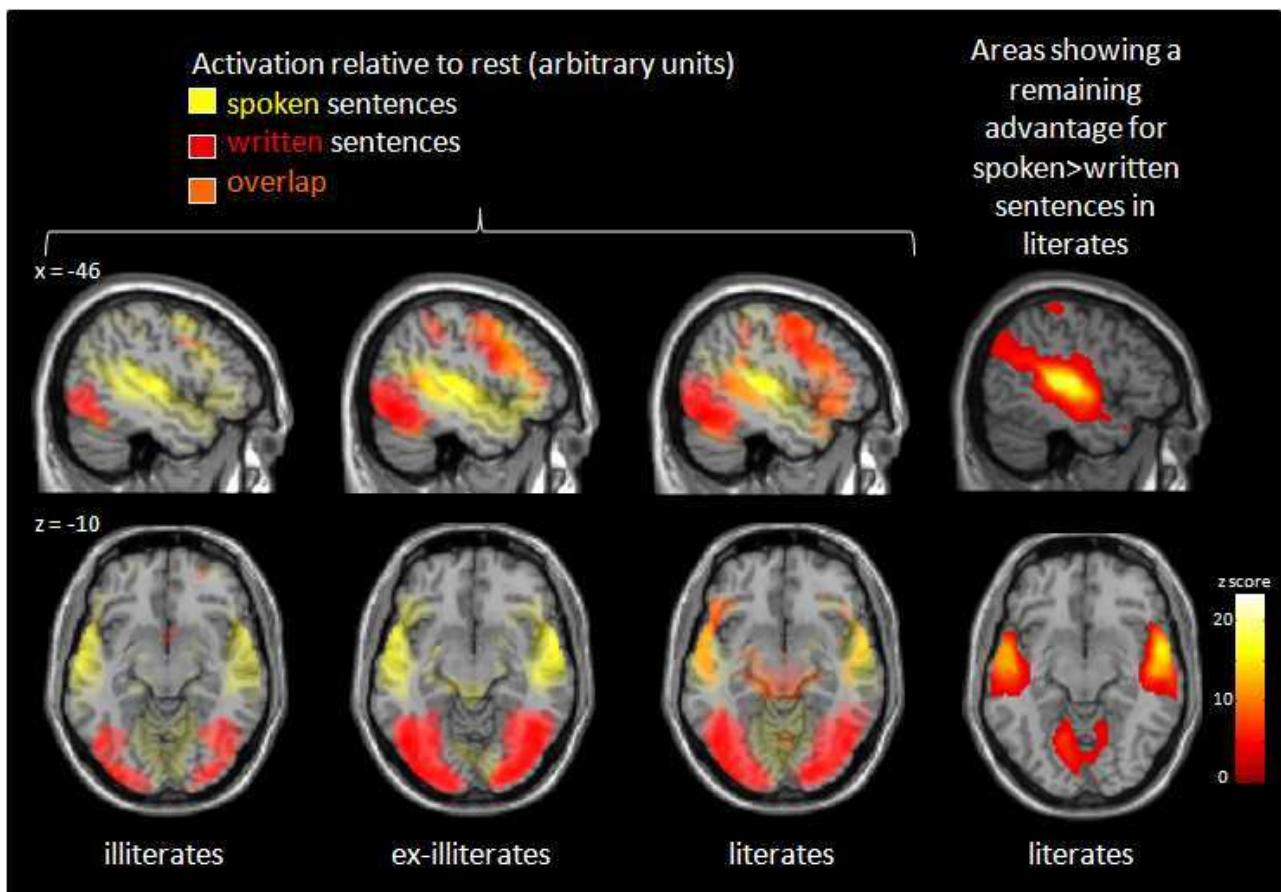
6) *Figure S6. Analyses of cortical competition induced by literacy at and around the individual peak responses to faces and houses.*

In each graph, the blue curve shows the mean activation induced by faces (left) or houses (right) relative to rest, at the individual peak of the relevant contrast (faces-houses or houses-faces) and in successive concentric shells of increasing radius (one voxel = 2 mm). The red curve shows an estimate of the competitive effect of literacy (decrease in activation with increasing reading performance). P values indicate the significance of a linear regression assessing the impact of the reading score on the activation to faces in the given region of interest.



7) *Figure S7. Plots of fMRI responses at a-priori peaks within left-hemispheric perisylvian language areas.*

Seven a-priori cortical areas were defined from the coordinates reported in the language lateralization study by Pinel et al. (S6), who used the same localizer as in the present study in a large group of French adults. Plots indicate the fMRI BOLD signal relative to rest in each condition (for the localizer runs, activation was pooled across sentences, motor commands, and calculation problems, separately for the spoken and written modalities). One-tailed p values identify conditions in which a significant effect of reading performance was found (linear regression; n.s. =  $p > 0.05$ , one-tailed). The plots largely replicate the findings of figures 2, 3A and 5B, which are based on peaks identified by the effect of literacy on the activation to written sentences.



8) Figure S8. Comparison of activations to written and spoken sentences.

Left columns show the raw activation to spoken and written sentences relative to rest in the localizer runs (for greater comparability between groups with different numbers of subjects, the figure does not show statistical t maps, but BOLD signal maps arbitrarily thresholded at 0.50% of the mean BOLD signal over the whole brain; similar results were seen with t maps). The regions in orange, corresponding to the overlap of spoken and written conditions, increase considerably with literacy to encompass the entire left perisylvian language network in literates, with the exception of primary auditory cortex and its vicinity. Nevertheless, the statistical maps at right show a remaining advantage to spoken language in the temporal lobe, but not the frontal lobe.

## IV. Supplementary tables

1) Table S1. Schooling and behavioral profiles of the six groups of participants

	<b>ILB (n=10)</b>	<b>EXP (n=11)</b>	<b>EXB (n=10)</b>	<b>LB2 (n=11)</b>	<b>LP (n=11)</b>	<b>LB1 (n=10)</b>
<b>Sex</b>	5M/5F	2M/9F	5M/5F	6M/5F	5M/6F	5M/5F
<b>Age</b>	53.3 ± 6.8 [44-64]	49.7 ± 9.6 [34-68]	49.5 ± 9.9 [31-61]	55.3 ± 4.6 [49-64]	46.3 ± 9.9 [34-60]	44.3 ± 8.0 [32-57]
<b>early education(yrs)</b>	0.2 ± 0.4 [0-1]	0.0 ± 0.2 [0-0.5]	0.4 ± 1.0 [0-1]	5.3 ± 1.6 [2-7]	9.0 ± 3.3 [5-12]	12.0 ± 0.0 [12-12]
<b>total education(yrs)</b>	0.8 ± 1.0 [0.1-3.5]	2.5 ± 1.1 [1-5]	2.1 ± 1.9 [1-7]	6.7 ± 2.9 [3-13]	10.8 ± 5.2 [5-16]	16.0 ± 0.0 [16-16]
<b>letter identification(%)</b>	51.7 ± 25.9 [9-87]	93.9 ± 6.1 [82-100]	93.0 ± 5.5 [83-96]	95.3 ± 3.0 [91-100]	97.4 ± 5.2 [82-100]	97.4 ± 2.2 [96-100]
<b>word reading accuracy(%)</b>	0.0 ± 0.0 [0-0]	71.7 ± 28.5 [14-94]	86.1 ± 18.7 [47-100]	95.1 ± 7.2 [75-100]	99.2 ± 2.0 [94-100]	100 ± 0.0 [100-100]
<b>simple regular</b>	0.0 ± 0.0 [0-0]	87.3 ± 23.1 [25-100]	100.0 ± 0.0 [100-100]	97.7 ± 7.5 [75-100]	100 ± 0.0 [100,100]	100 ± 0.0 [100-100]
<b>complex regular</b>	0.0 ± 0.0 [0-0]	73.0 ± 35.0 [0-100]	85.9 ± 28.1 [25-100]	99.3 ± 2.4 [92-100]	99.2 ± 2.7 [91-100]	100 ± 0.0 [100-100]
<b>irregular</b>	0.0 ± 0.0 [0-0]	54.8 ± 33.0 [0-83]	72.5 ± 28.0 [17-100]	88.6±13.2 [58-100]	98.4 ± 3.6 [91-100]	100 ± 0.0 [100-100]
<b>pseudoword reading accuracy(%)</b>	0.0 ± 0.0 [0-0]	68.2 ± 23.8 [19-100]	85.0 ± 21.9 [38-100]	94.9 ± 9.2 [75-100]	94.9 ± 9.2 [75-100]	100 ± 0.0 [100-100]
<b>simple</b>	0.0 ± 0.0 [0-0]	78.7 ± 21.0 [25-100]	92.5 ± 10.5 [75-100]	96.7 ± 5.6 [88-100]	95.5 ± 10.1 [75-100]	100 ± 0.0 [100-100]
<b>complex</b>	0.0 ± 0.0 [0-0]	57.4 ± 31.6 [0-100]	77.6 ± 33.2 [0-100]	93.3 ± 12.8 [63-100]	94.3 ± 10.3 [75-100]	100 ± 0.0 [100-100]
<b>word reading speed (per min)</b>	n/a	14.6 ± 11.5 [2-32]	29.5 ± 19.5 [7-55]	68.7 ± 31.7 [29-140]	95.4 ± 22.7 [55-132]	128 ± 13.4 [109-150]
<b>pseudoword reading speed (per min)</b>	n/a	10.6 ± 9.85 [1-30]	23.1 ± 12.8 [6-38]	51.9 ± 20.5 [23-99]	64.6 ± 20.4 [38-102]	91.5 ± 19.5 [59-126]
<b>sentence reading- Lobrot (% correct)</b>	n/a	10.5 ± 11.1 [0-38]	24.7 ± 17.9 [0-47]	56.6 ± 21.7 [19-97]	84.8 ± 21.3 [44-100]	97.0 ± 2.8 [94-100]

2) Table S2. Additional tests performed on peaks identified by the main SPM analysis

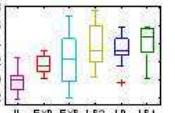
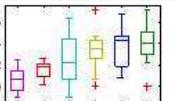
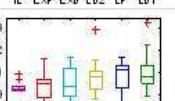
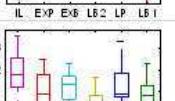
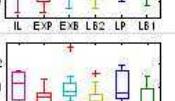
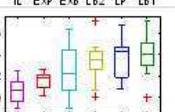
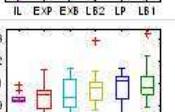
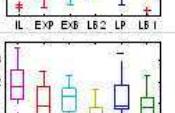
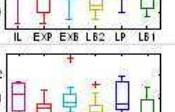
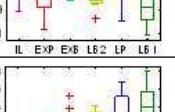
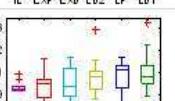
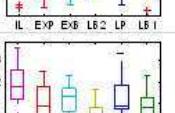
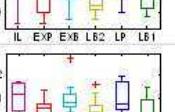
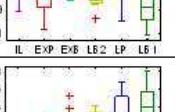
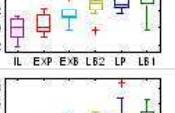
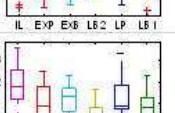
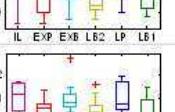
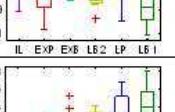
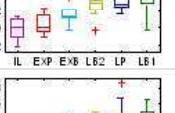
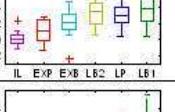
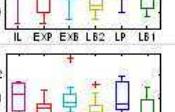
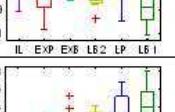
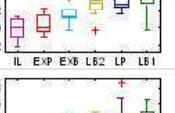
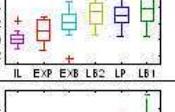
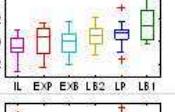
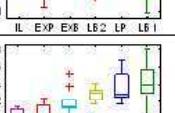
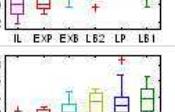
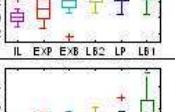
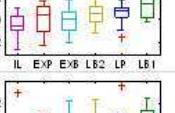
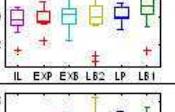
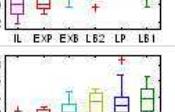
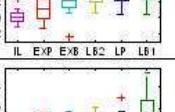
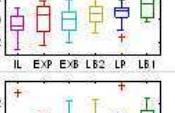
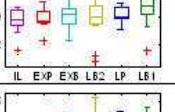
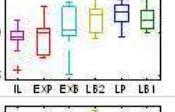
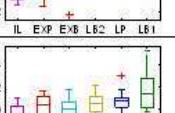
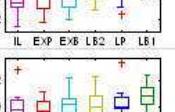
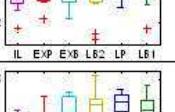
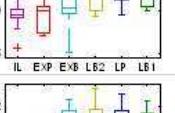
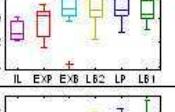
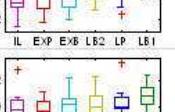
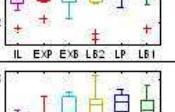
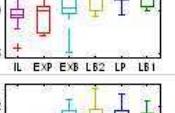
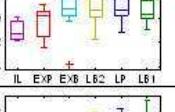
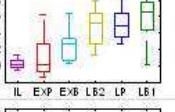
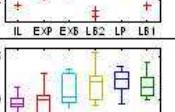
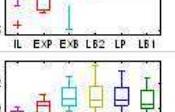
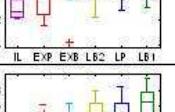
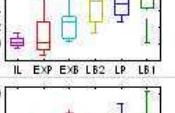
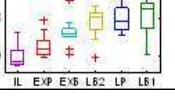
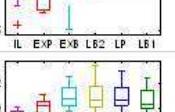
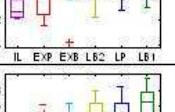
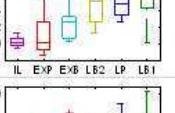
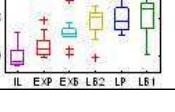
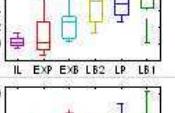
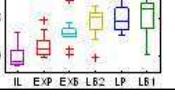
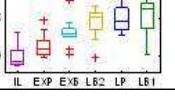
The first column indicates the brain location under analysis and its coordinates in the Montreal Neurological Institute coordinate system.

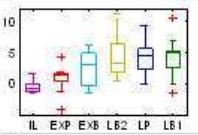
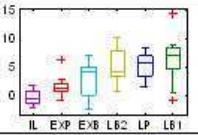
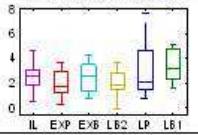
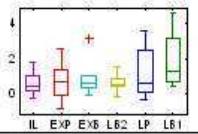
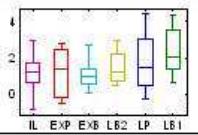
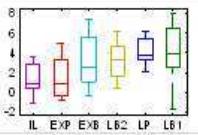
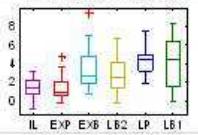
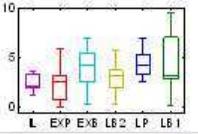
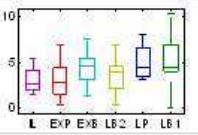
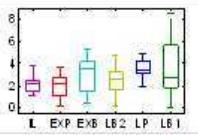
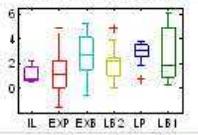
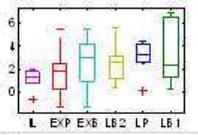
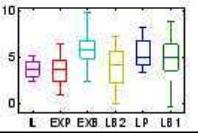
The second column indicates the literacy effect which is being analyzed. For instance, “increased activation to written sentences” means that the effect tested in this line is whether the activation to written sentences increased with increasing reading scores. For a given brain location, the first line, highlighted in light blue, always indicates the contrast that was used to identify the peak coordinates in the whole-brain SPM analysis. The next lines, highlighted in light gray, probe additional effects obtained at the same location in other statistically independent experimental conditions.

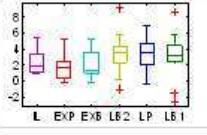
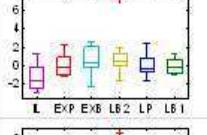
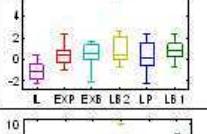
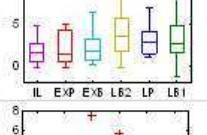
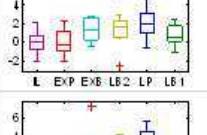
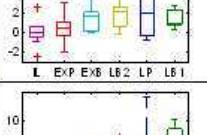
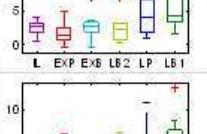
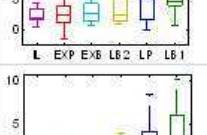
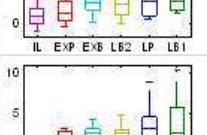
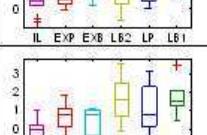
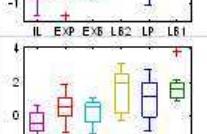
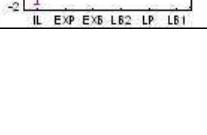
The next five columns report various additional statistics testing whether the observed effect can be attributed to schooling, literacy, and proficiency, once other variables are controlled for. See supplementary Methods section for detailed descriptions of these statistics. For each statistic, the table gives the signed t-test indicating the direction of the effect (plus sign = activation increases with reading score; minus sign = activation decreases with reading score), as well as the one-tailed p values (since we are testing only for the predicted direction of the effect). Values in white arise parentheses are only bordering on significance ( $0.05 < p < 0.10$ ) and should be considered only as indicative. Ns = not significant ( $p > 0.10$ ).

Finally, the last column reports the value of the contrast within each group of subjects, in the same format as figure S5 (central mark = median, box = 25<sup>th</sup> and 75<sup>th</sup> percentiles, whiskers = min and max of non-outliers, crosses = outliers, defined as lying outside 1.5 times the 25<sup>th</sup>-to-75<sup>th</sup> percentile range).

**Table S2. Additional tests performed on peaks identified by the main SPM analysis.**

Brain region	Effect tested	Main effect of reading score (corrected for age and country)	Effect of schooling within low-SES adults (LB2-ILB)	Pure effect of late literacy (rs in EX+HL)	Pure effect of early schooling (LB2-EXB   rs)	Impact of eventual proficiency within the early schooled (rs in LIT)	Activation in the six groups of participants (after correction for age and country)
left VWFA (-44, -50, -14)	increased activation to written sentences	t(59)= 4.46 <b>&lt;0.0001</b>	t(18)= 3.94 <b>0.0005</b>	t(27)= 3.12 <b>0.0021</b>	t(17)= 0.61 ns	t(28)= 1.05 ns	    
	increased activation to written commands	t(59)= 4.27 <b>&lt;0.0001</b>	t(18)= 3.82 <b>0.0006</b>	t(27)= 2.89 <b>0.0037</b>	t(17)= 0.62 ns	t(28)= 0.69 ns	    
	increased activation to strings	t(59)= 2.63 <b>0.0055</b>	t(18)= 1.90 <b>0.037</b>	t(27)= 1.56 (0.06)	t(17)= 0.35 ns	t(28)= 0.21 ns	    
	reduced activation to faces	t(59)= -1.36 (0.09)	t(18)= -3.07 <b>0.0033</b>	t(27)= 0.27 ns	t(17)= -2.73 <b>0.0072</b>	t(28)= -0.41 ns	    
	reduced activation to checkerboards	t(59)= -2.28 <b>0.013</b>	t(18)= -1.79 <b>0.046</b>	t(27)= 0.54 ns	t(17)= -0.91 ns	t(28)= -3.30 <b>0.0013</b>	    
left posterior STS (-50, -44, 6)	increased activation to written sentences	t(59)= 7.24 <b>&lt;0.0001</b>	t(18)= 5.01 <b>&lt;0.0001</b>	t(27)= 2.86 <b>0.004</b>	t(17)= 0.06 ns	t(28)= 2.06 <b>0.024</b>	    
	increased activation to written commands	t(59)= 5.78 <b>&lt;0.0001</b>	t(18)= 5.19 <b>&lt;0.0001</b>	t(27)= 2.90 <b>0.0036</b>	t(17)= 0.65 ns	t(28)= 0.66 ns	    
left temporal pole (-50, 12, -24)	increased activation to written sentences	t(59)= 3.85 <b>0.0001</b>	t(18)= 1.96 <b>0.033</b>	t(27)= 0.64 ns	t(17)= 0.56 ns	t(28)= 1.35 ns	    
	increased activation to written commands	t(59)= 1.39 (0.08)	t(18)= -0.23 ns	t(27)= 0.49 ns	t(17)= -0.51 ns	t(28)= 0.47 ns	    
left IFG (-54, 26, -6)	increased activation to written sentences	t(59)= 3.72 <b>0.0002</b>	t(18)= 2.88 <b>0.0050</b>	t(27)= 1.48 (0.075)	t(17)= 1.09 ns	t(28)= 0.18 ns	    
	increased activation to written commands	t(59)= 2.88 <b>0.0028</b>	t(18)= 3.36 <b>0.0017</b>	t(27)= 3.23 <b>0.0016</b>	t(17)= 0.36 ns	t(28)= -0.24 ns	    
left premotor (-46, -2, 52)	increased activation to written sentences	t(59)= 5.69 <b>&lt;0.0001</b>	t(18)= 5.85 <b>&lt;0.0001</b>	t(27)= 2.08 <b>0.024</b>	t(17)= 2.58 <b>0.01</b>	t(28)= -0.10 ns	   
	increased activation to written commands	t(59)= 6.12 <b>&lt;0.0001</b>	t(18)= 5.85 <b>&lt;0.0001</b>	t(27)= 3.78 <b>0.0004</b>	t(17)= 3.78 (0.06)	t(28)= 0.56 ns	  

left SMA (-4, 2, 62)	increased activation to written sentences	$t(59)=4.64$ <b>&lt;0.0001</b>	$t(18)=4.34$ 0.0002	$t(27)=3.69$ 0.0005	$t(17)=0.67$ ns	$t(28)=0.17$ ns	
	increased activation to written commands	$t(59)=5.63$ <b>&lt;0.0001</b>	$t(18)=5.31$ <b>&lt;0.0001</b>	$t(27)=5.06$ <b>&lt;0.0001</b>	$t(17)=0.84$ ns	$t(28)=0.11$ ns	
right anterior fusiform (38, -42, -20)	increased activation to faces	$t(59)=2.76$ <b>0.0038</b>	$t(18)=-0.91$ ns	$t(27)=1.47$ ns	$t(17)=-1.69$ ns	$t(28)=1.30$ ns	
left parahippocampal (-28, -46, -8)	increased activation to houses	$t(59)=2.68$ <b>0.0047</b>	$t(18)=0.16$ ns	$t(27)=1.22$ ns	$t(17)=-0.16$ ns	$t(28)=1.58$ (0.06)	
right parahippocampal (28, -42, -12)	increased activation to houses	$t(59)=2.79$ <b>0.0036</b>	$t(18)=0.86$ ns	$t(27)=0.42$ ns	$t(17)=0.28$ ns	$t(28)=0.52$ ns	
right occipital (22, -86, -10)	increased activation to written sentences	$t(59)=3.71$ <b>0.0002</b>	$t(18)=2.21$ 0.02	$t(27)=3.44$ 0.0009	$t(17)=-0.49$ ns	$t(28)=0.99$ ns	
	increased activation to written commands	$t(59)=3.83$ <b>0.0002</b>	$t(18)=2.17$ 0.022	$t(27)=3.58$ 0.0007	$t(17)=-1.43$ ns	$t(28)=1.03$ ns	
	Increased activation to faces	$t(59)=3.40$ <b>0.0006</b>	$t(18)=1.47$ (0.08)	$t(27)=3.10$ 0.0023	$t(17)=-2.07$ ns	$t(28)=0.60$ ns	
	Increased activation to houses	$t(59)=3.62$ <b>0.0003</b>	$t(18)=0.94$ ns	$t(27)=3.22$ 0.0017	$t(17)=-2.46$ ns	$t(28)=0.93$ ns	
	Increased activation to tools	$t(59)=3.41$ <b>0.0006</b>	$t(18)=0.90$ ns	$t(27)=3.05$ 0.0026	$t(17)=-2.32$ ns	$t(28)=0.92$ ns	
	Increased activation to strings	$t(59)=3.58$ <b>0.0003</b>	$t(18)=2.34$ 0.016	$t(27)=3.40$ 0.0011	$t(17)=-2.57$ ns	$t(28)=0.43$ ns	
	Increased activation to falsefonts	$t(59)=3.91$ <b>0.0001</b>	$t(18)=2.45$ 0.012	$t(27)=3.91$ 0.0003	$t(17)=-1.96$ ns	$t(28)=0.70$ ns	
	Increased activation to checkers	$t(59)=1.83$ <b>0.037</b>	$t(18)=0.49$ ns	$t(27)=3.22$ 0.0017	$t(17)=-2.16$ ns	$t(28)=0.17$ ns	

left calcarine (-12, -88, 2)	increased difference for horizontal > vertical checkers	$t(59)=2.03$ <b>0.024</b>	$t(18)=0.98$ ns	$t(27)=1.05$ ns	$t(17)=1.15$ ns	$t(28)=0.19$ (0.06)	
	increased activation to written sentences	$t(59)=0.82$ ns	$t(18)=2.36$ <b>0.015</b>	$t(27)=2.97$ <b>0.0031</b>	$t(17)=0.88$ ns	$t(28)=-1.46$ ns	
	increased activation to written commands	$t(59)=1.93$ <b>0.029</b>	$t(18)=3.24$ <b>0.0023</b>	$t(27)=3.25$ <b>0.0015</b>	$t(17)=1.30$ ns	$t(28)=-0.91$ ns	
right calcarine (16, -88, 2)	increased difference for horizontal > vertical checkers	$t(59)=3.04$ <b>0.0018</b>	$t(18)=2.26$ <b>0.018</b>	$t(27)=1.64$ (0.06)	$t(17)=-0.39$ ns	$t(28)=0.95$ ns	
	increased activation to written sentences	$t(59)=1.69$ <b>0.048</b>	$t(18)=2.01$ <b>0.030</b>	$t(27)=3.19$ <b>0.0018</b>	$t(17)=-0.54$ ns	$t(28)=-0.54$ ns	
	increased activation to written commands	$t(59)=2.10$ <b>0.020</b>	$t(18)=3.02$ <b>0.0037</b>	$t(27)=3.27$ <b>0.0015</b>	$t(17)=-1.05$ ns	$t(28)=-1.28$ ns	
left planum temporale (-38, -28, 18)	increased activation to spoken sentences	$t(59)=4.65$ <b>&lt;0.0001</b>	$t(18)=0.39$ ns	$t(27)=1.20$ ns	$t(17)=-0.81$ ns	$t(28)=2.97$ <b>0.0076</b>	
	increased activation to spoken commands	$t(59)=4.19$ <b>&lt;0.0001</b>	$t(18)=0.83$ ns	$t(27)=1.67$ (0.053)	$t(17)=-0.64$ ns	$t(28)=2.89$ <b>0.0073</b>	
	Increased activation to spoken words	$t(59)=3.88$ <b>0.0001</b>	$t(18)=2.08$ <b>0.026</b>	$t(27)=1.85$ <b>0.038</b>	$t(17)=0.05$ ns	$t(28)=1.88$ <b>0.035</b>	
	Increased activation to spoken pseudowords	$t(59)=3.82$ <b>0.0002</b>	$t(18)=1.92$ <b>0.035</b>	$t(27)=2.48$ <b>0.0098</b>	$t(17)=-0.40$ ns	$t(28)=1.89$ <b>0.035</b>	
left fusiform (-48, -52, -8)	increased activation to spoken words	$t(59)=4.43$ <b>&lt;0.0001</b>	$t(18)=3.97$ <b>0.0005</b>	$t(27)=1.58$ (0.063)	$t(17)=1.03$ ns	$t(28)=-0.06$ ns	
	Increased activation to spoken pseudowords	$t(59)=5.32$ <b>&lt;0.0001</b>	$t(18)=4.02$ <b>0.0004</b>	$t(27)=1.73$ <b>0.047</b>	$t(17)=1.18$ ns	$t(28)=0.95$ ns	

## **V. References for supplementary materials**

- S1. P. E. Turkeltaub, L. Gareau, D. L. Flowers, T. A. Zeffiro, G. F. Eden, *Nat Neurosci* **6**, 767 (Jul, 2003).
- S2. R. Kolinsky, J. Morais, A. Content, L. Cary, *Perception* **16**, 399 (1987).
- S3. R. Kolinsky *et al.*, Enantiomorphy through the Looking-Glass: Literacy effects on mirror-image discrimination. Manuscript submitted to *JEP: General, in 2nd revision*, (2010).
- S4. P. Ventura *et al.*, *J Exp Child Psychol* **100**, 79 (Jun, 2008).
- S5. A. Sucena, S. L. Castro, *Aprender a ler e avaliar a leitura. O TIL, Teste de Idade de Leitura (2<sup>a</sup> edição actualizada)*. (Almedina, Coimbra, 2009).
- S6. P. Pinel, S. Dehaene, *J Cogn Neurosci*, (Jan 13, 2009).
- S7. B. Thirion *et al.*, *Neuroimage* **35**, 105 (Mar, 2007).
- S8. P. Pinel *et al.*, *BMC Neurosci* **8**, 91 (2007).
- S9. F. Chochon, L. Cohen, P. F. van de Moortele, S. Dehaene, *J. Cog. Neurosci.* **11**, 617 (1999).
- S10. T. D. Wager, T. E. Nichols, *Neuroimage* **18**, 293 (Feb, 2003).
- S11. S. Dehaene *et al.*, *Neuroimage* **49**, 1837 (Jan 15, 2010).
- S12. A. Castro-Caldas, K. M. Petersson, A. Reis, S. Stone-Elander, M. Ingvar, *Brain* **121**, 1053 (1998).
- S13. P. Ventura, J. Morais, R. Kolinsky, *Cognition* **105**, 547 (Dec, 2007).
- S14. J. C. Ziegler, L. Ferrand, *Psychonomic Bulletin & Review* **5**, 683 (1998).
- S15. J. C. Ziegler, A. Petrova, L. Ferrand, *J Exp Psychol Learn Mem Cogn* **34**, 643 (May, 2008).
- S16. P. Ventura, R. Kolinsky, C. Pattamadilok, J. Morais, *J Exp Child Psychol* **100**, 135 (Jun, 2008).
- S17. J. C. Ziegler, M. Muneaux, *Psychon Bull Rev* **14**, 75 (Feb, 2007).
- S18. J. C. Ziegler, L. Ferrand, M. Montant, *Mem Cognit* **32**, 732 (Jul, 2004).
- S19. L. Perre, J. C. Ziegler, *Brain Res* **1188**, 132 (Jan 10, 2008).
- S20. L. Perre, C. Pattamadilok, M. Montant, J. C. Ziegler, *Brain Res* **1275**, 73 (Jun 12, 2009).
- S21. C. Pattamadilok, R. Kolinsky, S. Luksaneeyanawin, J. Morais, *Quarterly journal of experimental psychology (2006)* **61**, 1515 (Oct, 2008).
- S22. C. Pattamadilok, L. Perre, S. Dufau, J. C. Ziegler, *J Cogn Neurosci* **21**, 169 (Jan, 2009).
- S23. E. Vul, C. Harris, P. Winkielman, H. Pashler, *Perspectives in Psychological Science* **4**, 274 (2009).
- S24. N. Kriegeskorte, W. K. Simmons, P. S. Bellgowan, C. I. Baker, *Nat Neurosci* **12**, 535 (May, 2009).
- S25. E. Vul, N. Kanwisher, Begging the Question: The Non-Independence Error in fMRI Data Analysis, in *Foundational issues for human brain mapping*, S. Hanson, M. Bunzl, Eds. (MIT Press, Cambridge, Mass., 2010), pp. 71-92.
- S26. L. Cohen, S. Dehaene, F. Vinckier, A. Jobert, A. Montavont, *Neuroimage* **40**, 353 (Mar 1, 2008).
- S27. G. Golarai *et al.*, *Nat Neurosci* **10**, 512 (Apr, 2007).

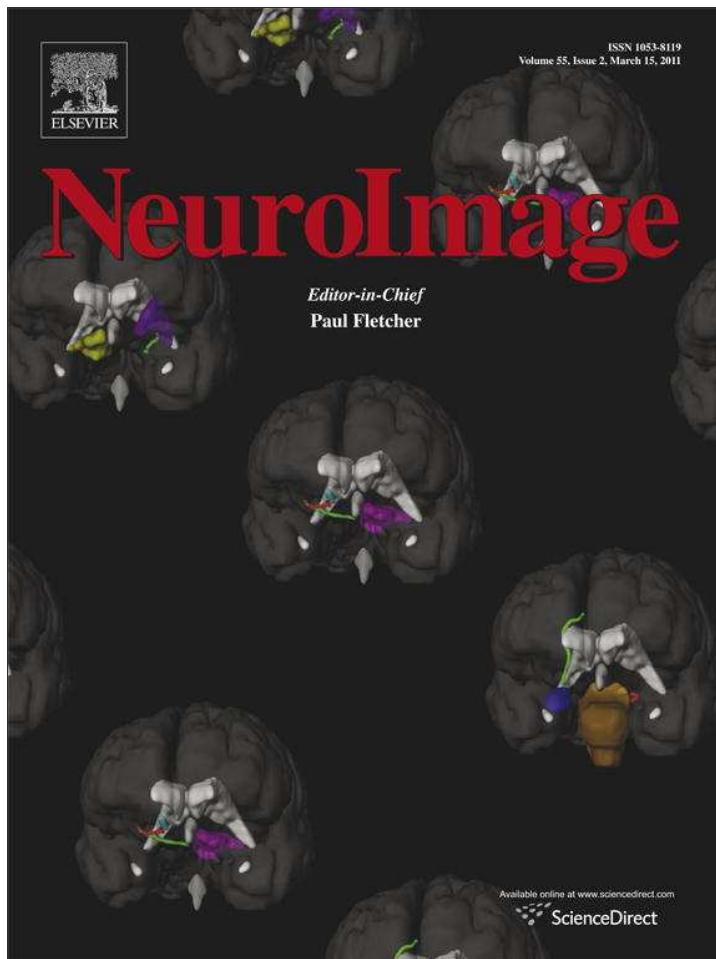
## **Expérience 2: L'invariance en miroir chez les lettrés (étude IRMf)**

En parallèle, nous avons pu réaliser une deuxième expérience, cette fois-ci restreinte aux sujets lettrés, sur l'invariance en miroir (voir partie I, chapitre 2). Pour résumer, cette invariance du système visuel consiste à généraliser les images vues selon une orientation donnée à leur image en miroir, ce qui nous permet de reconnaître sans difficulté l'image inversée de la Joconde par exemple, même si cette nouvelle image, présentant une configuration spatiale très distincte, n'a jamais été vue auparavant. En revanche, lorsque nous apprenons à lire, nous devons briser cette généralisation en miroir afin de pouvoir distinguer un "b" et un "d". D'ailleurs, lorsqu'ils commencent à apprendre à lire et à écrire, les enfants éprouvent tout naturellement des difficultés à distinguer la bonne orientation des lettres, et commettent fréquemment à ce stade des erreurs d'écritures en miroir.

Dans cette expérience nous avons utilisé un paradigme d'amorçage avec de brèves présentations de paires de stimuli, constituées soit de lettres isolées, soit d'images iconiques équivalentes, tout en enregistrant l'activité cérébrale à l'aide de l'IRMf. Sachant que les réponses cérébrales diminuent lorsqu'on présente séquentiellement deux stimuli identiques (« repetition suppression » en anglais), nous avons profité de ce phénomène pour manipuler l'orientation gauche-droite des paires et déterminer ainsi si le cerveau traite les paires en miroir comme égales ou différents. Nous avons mis en évidence que la région occipito-temporal gauche, qui est spécialisée dans le traitement de la forme visuelle des mots (VWFA), discrimine l'orientation gauche-droite des *lettres*, et cela de façon automatique (sans interférence de stratégies ‘descendantes’). En contrepartie, pour les *images* non-alphabétiques, cette même région ne fait pas de distinction entre les images originales et leur version en miroir, et présente donc une invariance en miroir. En conclusion, l'invariance en miroir est brisée pour les stimuli alphabétiques mais conservée pour la catégorie pictographique. Toutefois, on ne peut exclure qu'avec des méthodes plus sensibles, on puisse mettre en évidence un certain degré de *transfert* de cette capacité de discrimination de l'orientation, acquise avec l'alphabétisation pour les stimuli alphabétiques, aux stimuli non pertinents pour la lecture.

Ces résultats ont été publiés dans la revue *Neuroimage*, que nous reproduisons ci-dessous.

Provided for non-commercial research and education use.  
Not for reproduction, distribution or commercial use.



This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/copyright>



## Breaking the symmetry: Mirror discrimination for single letters but not for pictures in the Visual Word Form Area

Felipe Pegado <sup>a,b,c,\*</sup>, Kimihiro Nakamura <sup>a,b,c,d</sup>, Laurent Cohen <sup>e,f,g</sup>, Stanislas Dehaene <sup>a,b,c,d</sup>

<sup>a</sup> INSERM, U992, Cognitive Neuroimaging Unit, F-91191 Gif/Yvette, France

<sup>b</sup> CEA, DSV/I2BM, NeuroSpin Center, F-91191 Gif/Yvette, France

<sup>c</sup> Univ Paris-Sud, Cognitive Neuroimaging Unit, F-91191 Gif/Yvette, France

<sup>d</sup> Collège de France, F-75005 Paris, France

<sup>e</sup> AP-HP, Groupe hospitalier Pitié-Salpêtrière, Department of Neurology, Paris, France

<sup>f</sup> INSERM, ICM Research Center, UMRS 975, Paris, France

<sup>g</sup> Université Paris 6, Faculté de Médecine Pitié-Salpêtrière, Paris, France

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 23 June 2010

Revised 23 October 2010

Accepted 12 November 2010

Available online 24 November 2010

#### Keywords:

Mirror-images

Reading

VWFA

Priming

Letters

fMRI

### ABSTRACT

Humans and primates can quickly recognize mirror images of previously exposed pictures. This spontaneous mirror invariance, though advantageous for visual recognition, makes it difficult to distinguish the orientation of letters (e.g. to differentiate a "b" from a "d"), and may result in classical mirror reading and writing errors in preschoolers. Mirror invariance must therefore be overcome during reading acquisition. The Visual Word Form Area (VWFA), a region in the ventral stream that develops with reading expertise, was previously shown to discriminate words from their mirror images in literate adults. Here we investigate whether this region underlies mirror-image discrimination at the most elementary level of the orthographic code, the single-letter level. Using an fMRI priming paradigm, we demonstrate that the VWFA distinguishes the left-right orientation of single letters in skilled readers, and yet exhibits mirror invariance for simple pictures of matched complexity. These results clarify how letter shapes, after reading acquisition, escape the process of mirror invariance which is a basic property of the ventral visual shape recognition pathway.

© 2010 Elsevier Inc. All rights reserved.

### Introduction

Humans, monkeys, pigeons and even octopuses can easily recognize reflected mirror images of pictures previously exposed, although these mirror images induce a very different retinal projection (Sutherland, 1960; Mello, 1965; Hollard and Delius, 1982; Tarr and Pinker, 1989; Logothetis et al., 1995; Rollenhagen and Olson, 2000; Baylis and Driver, 2001; Fiser and Biederman, 2001). This spontaneous "mirror invariance" phenomenon enables one to recognize images which are indifferently seen from a left or right perspective (e.g. left or right profile of a predator) and silhouettes of objects seen from opposite sides, representing an advantage for learning and survival.

In humans this mirror-invariance mechanism has been demonstrated in adults (Tarr and Pinker, 1989; Biederman and Cooper, 1991) and is known to be already present in infants (Bornstein et al., 1978). Mirror-invariance poses a challenging problem at the beginning of reading and writing acquisition. Because of the fixed orientation of letters in the Latin alphabet and many other writing

systems, and the presence of minimal pairs such as "b" and "d", mirror invariance is an undesirable property for reading. Many children initially make mirror errors in writing and reading, but after a few years of schooling, most become able to tell the correct orientation of letters (e.g. discriminate a "b" from a "d") for reading and writing (Cornell, 1985; Schott, 2007). Dyslexic children who present a specific difficulty in learning to read despite a normal intelligence level can be delayed in the acquisition of correct letter orientation (Terepocki et al., 2002), resulting in paradoxically better performances than controls in a same-different judgement task where mirror letters should be judged as "same" (Lachmann and van Leeuwen, 2007).

The brain's underpinnings of mirror invariance are starting to be uncovered in non-human primates and humans. Monkey's single cell recordings show neurons in visual ventral cortex (IT) responding in an equivalent way to a given picture and its mirror reflected presentation (Logothetis et al., 1995; Rollenhagen and Olson, 2000). In humans, the phenomenon of fMRI repetition suppression has been used to demonstrate that pictures and their mirror images can be encoded as the same object within the ventral stream (Eger, 2004; Vuilleumier et al., 2005; Dehaene et al., 2010). Investigating if written words elicit equivalent mirror priming as pictures in the occipito-temporal cortex is of particular importance since it has been claimed that this region is a domain-general site (Priftis et al., 2003; Price et al., 2006). Indeed, Dehaene et al. (2010) provided fMRI evidence that this

\* Corresponding author. INSERM U992, Cognitive Neuroimaging Unit, Gif sur Yvette, 91191, France. Fax: +33 1 69 08 79 73.

E-mail address: [felipepegado@yahoo.com](mailto:felipepegado@yahoo.com) (F. Pegado).

mirror invariance exists for pictures but not for written words. The same restricted region of the left occipito-temporal cortex, namely the Visual Word Form Area (VWFA), simultaneously showed mirror invariance for pictures and mirror discrimination for words. That is, it no longer showed repetition suppression when a word was preceded by a mirror-image version of itself. This region is known to adapt to orthographic stimuli during reading acquisition across different cultures (Cohen et al., 2000; McCandliss, 2003; Nakamura et al., 2005; Maurer et al., 2008; Dehaene, 2009; Graves et al., 2010), and it was therefore concluded that it may be the site of the loss of mirror invariance which occurs in young children and seems to be needed for efficient reading in alphabetic scripts.

The previous fMRI priming results of Dehaene et al. (2010), however, might simply be taken to mean that participants were unable to extract any significant visual information from the mirrored prime words. Obviously, however, this was the only category of stimuli which could not be identified — perhaps explaining that such stimuli, contrary to normal words, caused no repetition suppression. Furthermore, participants were engaged in a semantic task (object size discrimination), and it could be argued that pictures were nameable and semantically meaningful stimuli in both orientations, while the mirrored words were meaningless and task-irrelevant. Both of these factors, on their own, might explain the absence of mirror priming with mirrored words in the Dehaene et al. (2010) study. The motivation of the present study was therefore to investigate if mirror invariance and its absence for alphabetic stimuli could be replicated at a lower level of the orthographic code, the single-letter level, where these potential artifactual sources could be controlled (Lachmann and van Leeuwen, 2007). Here we presented single letters and complexity-matched pictographic stimuli, as well as their mirrored counterparts, as stimuli in an fMRI repetition suppression study. All stimuli were thus equally simple and relevant to the low-level visual perception task chosen. We investigated whether, in expert readers, the VWFA discriminated letters from their mirror images. We also wondered if other, perhaps earlier visual areas maintained a mirror-invariance for both letters and pictures.

## Material and methods

Fourteen healthy right handed subjects (mean age 46.5 (20–62), ten females), participated in the present study. All of them were skilled readers of French, and had normal or corrected to normal vision. None had antecedents of neurological or psychiatric diseases. One subject was excluded from the behavioural analysis because reaction time data were missing. All subjects gave written informed consent prior to the fMRI experiment. The present research was approved by the regional ethical committee, as part of a general research program on functional neuroimaging of the human brain which was sponsored by the Atomic Energy Commission (Denis Le Bihan).

The stimuli used for the behavioural task during the fMRI scanner were 12 different single letters strings in Arial font (a, c, e, r, s, z, b, f, g, h, k, and y) and 12 outline iconic pictures matched for size and total number of pixels (Q, O, E, F, A, X, J, T, S, R, I, and K). All stimuli were presented in black on a white background and occupied similar locations on screen. Each trial started with a fixation cross and a central frame for 50 ms, then the prime was presented for 50 ms, followed by another fixation cross and frame during 50 ms and finally the target was presented for 500 ms. Subjects performed a simple feature decision task: they had to judge if the target stimuli stayed within the central frame or whether part of it exceeded this boundary (Fig. 1). They responded by pressing right or left button respectively. Targets were always presented in a fixed orientation, which corresponded to the standard orientation for letters and was selected at random for pictures. Primes could be: 1/ exactly the same as target, 2/ the same but in a mirror oriented presentation, 3/

different in the same orientation or 4/ different in a mirror oriented presentation (see Fig. 1). A  $2 \times 2 \times 2$  factorial design was used, with two levels of stimulus category (letters or pictures, presented in distinct fMRI runs), two levels of orientation (normal or mirror) and two levels of repetition (same or different).

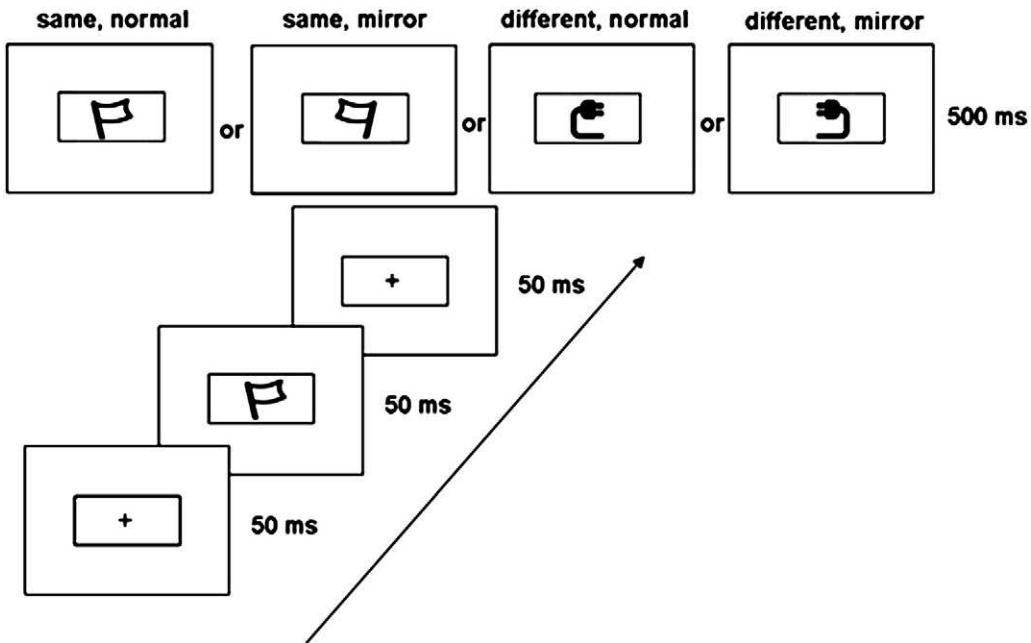
All imaging data were collected with a 3 Tesla MRI scanner (Trio 3T, Siemens) in Neurospin Imaging Center at Saclay, France. The following parameters were used: voxel resolution =  $3.8 \times 3.8 \times 4$  mm, with a gap of 1 mm between slices; matrix of  $64 \times 64$ , 24 slices per volume, TR = 1.4 s, and angle =  $80^\circ$ . Six runs, each lasting ~7 min and giving a total of 295 volumes were collected, three for single letters and the other three for iconic pictures, in a counterbalanced order. In each run, the four trial types were presented 40 times in a pseudo-randomized order using event-related design. In 40 additional trials within each run, the primes and targets were omitted, thus providing an event-related baseline condition relative to which we could compute activation in the other trials.

A two-level analysis was implemented in SPM5. First, functional images were corrected for head motion, resampled every 3 mm using tri-linear interpolation, normalized to the standard MNI brain space, and spatially smoothed with an isotropic Gaussian filter (5 mm full width at half maximum). Each individual participant's data was then modelled, within each fMRI run, by eight regressors obtained by convolution of the four experimental conditions with the canonical SPM hemodynamic response function and its time derivative. The model included high-pass filtering (cutoff 128 s). For each visual category (pictures and letters), we created four individual contrast maps corresponding to the four combinations of orientation (normal or mirror)  $\times$  repetition (same or different), each relative to the baseline. These eight contrast images from the first-level analysis were submitted to a second-level  $2 \times 2 \times 2$  factorial ANOVA, with factors of participants and within-subject factors of stimulus category (letters or pictures), repetition (same or different prime) and orientation of the first stimulus (normal or mirror). Unless otherwise stated, we used a voxelwise threshold of  $p < 0.001$  uncorrected across the brain volume. Because of our precise hypothesis concerning the lack of mirror invariance for letters in the VWFA, we also investigated this region using a small-volume search, both within a 6-mm sphere centered on *a priori* coordinates of the VWFA ( $-42, -57, -15$ ; Cohen et al., 2002), and within a mask formed by the voxels showing mirror priming in our previous study (Dehaene et al., 2010).

## Results

Subjects performed quite accurately, presenting a mean accuracy during feature decision task of 93.4% (standard deviation [SD] = 8.9%) for pictures and 93.3% (SD = 10.6%) for letters. Participants responded to letters as quickly as to pictures ( $p > 0.1$ ) (Fig. 2). The main effects of orientation and repetition priming were both highly significant ( $p < 0.001$  for both). These effects interacted with each other ( $p < 0.001$ ), as the effect size of priming was greater when the primes and targets were in the same orientation ("identity priming"; 70 ms effect,  $p < 0.001$ ) than when they were left-right flipped ("mirror priming"; 50 ms effect,  $p < 0.001$ ) (see Fig. 2). These priming effects were overall greater for pictures relative to letters ( $p < 0.005$ ). The triple interaction between the three effects did not reach significance ( $p > 0.1$ ), and in fact priming was significant in all four conditions, including mirror-priming for letters (43 ms,  $p < 0.001$ ). Thus, at the behavioural level we could not reveal any difference between the two categories concerning the priming effects of mirror pairs.

At the brain level, we first studied activations relative to rest. Both letters and pictures activated a similar bilateral fronto-parieto-temporo-occipital network, including strong activations in the bilateral ventral stream, extending from the occipital pole to about



**Fig. 1.** Experimental design. On each trial, a pair of visual stimuli was presented, in separate blocks for pictures and letters. We manipulated the relationship between the stimuli in the pair, in terms of identity (same or different) and orientation (normal or mirror). The task was to judge if the second stimulus was restricted to the central frame or exceeded it, by pressing the right or left button respectively. For details see the main text.

MNI  $y = -35$ . Activations were stronger for pictures than for letters in bilateral occipito-temporal lateral regions, predominantly in the right hemisphere (right:  $51, -72, 0$ ;  $Z = 4.58$ ; 82 voxels; left:  $-42, -81, 3$ ;  $Z = 4.19$ ; 29 voxels). Conversely, letters showed no greater activation relative to pictures at the standard threshold of  $p < 0.001$ .

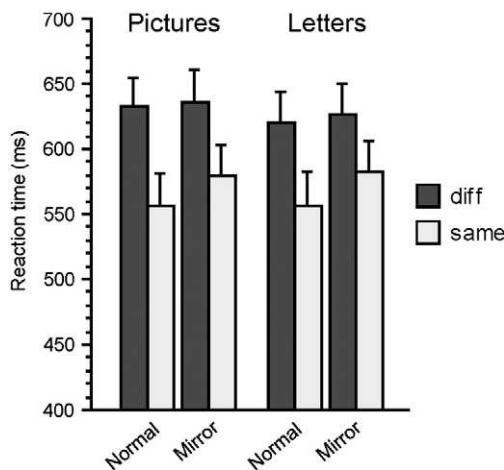
In order to examine the main effect of repetition, we contrasted trials in which the prime and the target represented the same item versus trials containing different exemplars, irrespective of their orientation. There was repetition suppression in a large part of the activated bilateral fronto-parieto-temporo-occipital network, including the ventral visual stream. Repetition suppression for pictures was present in the occipito-temporal cortex bilaterally (left:  $-39, -81, -6$ ;  $Z = 5.35$ , 344 voxels; right:  $48, -72, -3$ ;  $Z = 5.34$ ; 819 voxels) as well as in parietal ( $27, -54, 51$ ) and motor areas ( $-30, -6, 60$ ). Repetition reduction for letters was found in occipito-temporal cortex bilaterally, but with a slight left-hemisphere predominance (left:

$-45, -72, -6$ ;  $Z = 4.52$ ; 105 voxels; right:  $39, -60, -6$ ;  $Z = 4.04$ ; 39 voxels). No significant effect of repetition enhancement was found for pictures. For letters, only the anterior medial frontal cortex showed repetition enhancement effect ( $-3, 51, 3$ ;  $Z = 3.97$ ; 48 voxels).

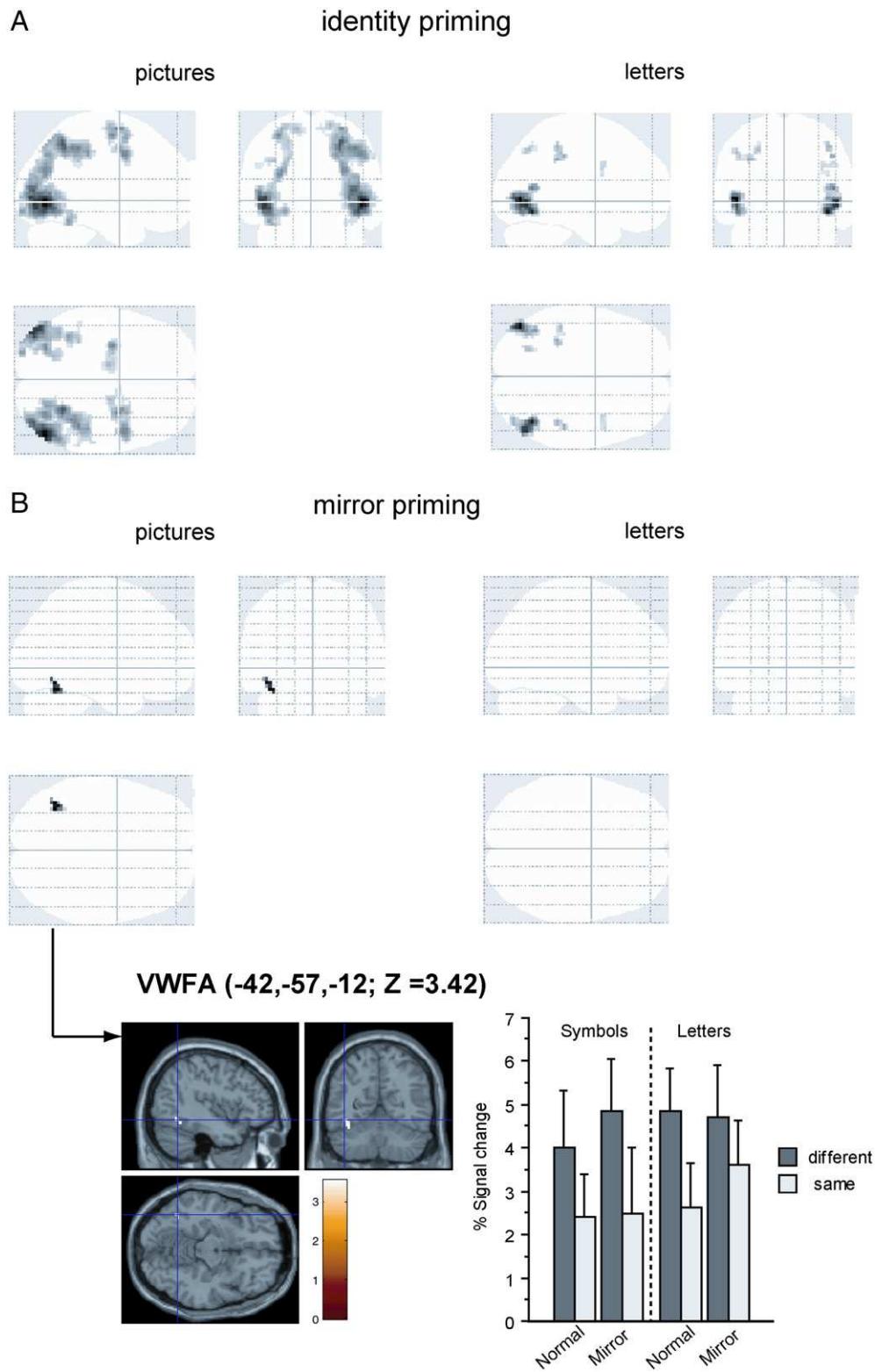
We then searched for a possible main effect of orientation. When we tested the orientation effect in [normal>mirror] direction, no effect was found. In contrast, when testing the [normal<mirror] contrast we found a bilateral occipito-temporal activation (right:  $51, -69, 0$ ;  $Z = 5.42$ , 159 voxels; left:  $-45, -81, 3$ ;  $Z = 5.22$ ; 68 voxels).

We then studied the interaction of the main factors of category and repetition, looking for voxels showing larger or smaller repetition suppression for pictures relative to letters. First, we started by verifying the effect of repetition suppression (same<different) restricted to pairs presenting the same orientation, i.e. “identity priming” effects. For pictures, we found bilateral occipito-temporal lateral and posterior regions, predominantly in the right hemisphere (right:  $51, -69, 0$ ;  $Z = 6.85$ ; 1203 voxels; left:  $-45, -78, -6$ ;  $Z = 6.25$ ; 464 voxels), as well as fronto-parietal activations (see Fig. 3A). Likewise, the equivalent analysis for letters showed a similar ventral visual network bilaterally (left:  $-45, -72, 3$ ;  $Z = 5.37$ ; 160 voxels; right:  $42, -60, -9$ ;  $Z = 5.20$ ; 189 voxels).

Our next analysis focused on the critical “mirror priming” effects, i.e., repetition suppression (same<different) for mirror-reversed pairs, which index orientation discrimination. First, when both pictures and letters were collapsed, we found a main effect of mirror priming only on the left occipito-temporal cortex, exactly at the VWFA coordinates ( $-42, -60, -9$ ;  $Z = 3.91$ ; 19 voxels). In order to understand the contribution of each category to the mirror priming effect, we restricted the analysis to pictures, and again significant repetition suppression was found in the same region ( $-42, -57, -12$ ;  $Z = 3.43$ ; 19 voxels) (see Fig. 3B). Although cluster extent was small and did not reach significance at cluster-size  $p < 0.05$ , corrected for multiple comparisons across the entire brain volume, the effect occurred exactly at the VWFA site expected from our previous mirror-priming work (Dehaene et al., 2010) (and see later for further analyses with a-priori regions of interest [ROIs]). Additionally, we found small clusters presenting mirror priming for pictures in bilateral premotor cortex (left:  $-27, -9, 54$ ; 15 voxels; right:  $48, 6,$



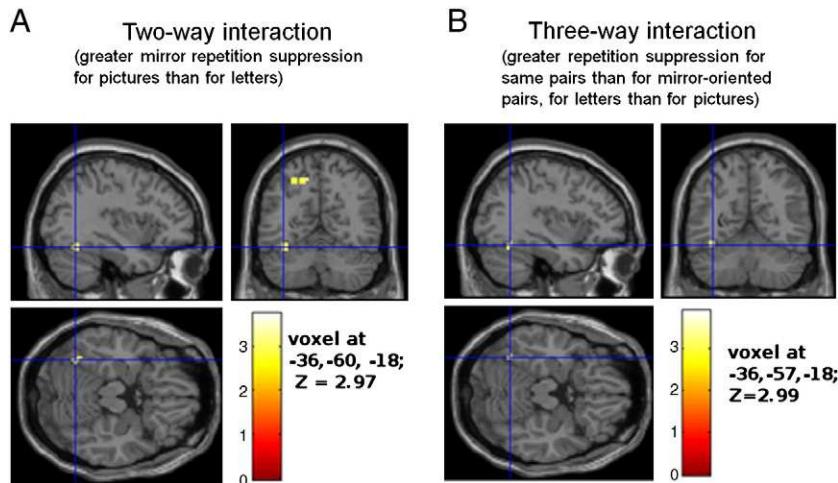
**Fig. 2.** Behavioural results (reaction times) during the fMRI experiment. Repetition priming effects were found for identity primes and mirror-image primes, irrespective of visual category. This priming pattern did not differ between pictures and letters at the behavioural level, because the triple interaction between repetition, orientation and visual category did not reach significance (see Results).



**Fig. 3.** fMRI priming effects for pictures and letters. (A) Identity priming. Pictures produced bilateral effects in the motor cortex, dorsal parietal and occipito-temporal regions, whereas letters produced more localized effects in bilateral occipito-temporal area. Note that this identity priming overlapped in bilateral occipito-temporal regions between the two categories. (B) Pictures, but not letters, produced mirror priming in the classical coordinates of the Visual Word Form Area (VWFA;  $-42, -57, -12$ ). This particular region showed greater mirror priming for pictures than for letters (see Fig. 4 and Results for further analysis). Figures A and B were plotted using a voxel threshold of  $p < 0.001$ , cluster-extent = 18 voxels (for illustration purposes).

36; 17 voxels), right cingulate (9, 27, 39; 12 voxels) and right supplementary motor area (6, 0, 57; 15 voxels), but no mirror priming was found in other regions of the ventral stream. For letters, no effect of mirror priming was found neither at conventional voxel-level

threshold ( $p < 0.001$ ) nor at a lower level ( $p < 0.005$ ). We used the interaction term to probe whether mirror repetition priming significantly differed between categories. Although no significant cluster was found at the classical threshold, when lowering the voxel-



**Fig. 4.** Effects of orientation and visual category on fMRI priming. (A) Category effects on mirror priming. Pictures produced greater mirror priming than letters in the left occipitotemporal cortex including the VWFA, with the maximum effect located slightly medial relative to its classical coordinates as identified in Fig. 2 (voxel  $p < 0.005$ , cluster-extend = 12 voxels for illustration purposes). (B) Effects of orientation and visual category on priming. This same region showed significant triple interaction between repetition, orientation and category (see Results for further analysis) (voxel  $p < 0.005$ , cluster-extend = 5 voxels for illustration purposes).

level threshold to  $p < 0.005$ , pictures showed greater mirror repetition suppression than letters in the left occipito-temporal region ( $-36, -60, -18; Z = 2.97$ ; 13 voxels; voxel-level 0.005) and left parietal cortex ( $-12, -57, -51$ ) (see Fig. 4A). Inversely, letters did not show more mirror priming than pictures. These results suggest better orientation discrimination for letters than for pictures at left occipito-temporal cortex, at coordinates previously described as the VWFA.

We probed the significance of these results with two small-volume correction analyses using two independent ROIs arising from previously published studies. Our first ROI was a spherical one and included all voxels within a 6-mm radius of the *a priori* coordinates of the VWFA (Cohen et al., 2002). The second ROI comprised all voxels in the left occipito-temporal region which showed a significant effect of mirror priming for pictures in our previous study (Dehaene et al., 2010; masking threshold  $p < 0.001$ ). We then used both ROIs as smaller search volumes for the mirror-priming effect in the present study, separately for each of the two stimulus categories. The first ROI analysis showed a robust mirror priming effect for pictures in the classical VWFA ( $-42, -57, -12, Z = 3.43, p = 0.003$ , FDR-corrected for multiple comparisons over the ROI). Using the second ROI, we also found a significant effect of mirror priming for pictures at a slightly shifted location ( $-36, -57, -18; Z = 3.41, p = 0.004$ , FDR-corrected). In contrast, for letters, neither of these two complementary analyses showed a significant effect of mirror priming for letters.

ROIs were also searched for the 2-way interaction of repetition (different>same)  $\times$  category (pictures>letters) for mirror pairs. Both the 6 mm-sphere and the second ROI showed a significant effect (respectively at  $-36, -57, -15; Z = 2.94$ ;  $p < 0.04$  FDR-corrected and at  $-36, -60, -18; Z = 2.97$ ;  $p < 0.03$  FDR-corrected).

Finally, we looked at the interaction term which compared the magnitude of identity priming (for same-orientation pairs) and of mirror priming (for mirror-oriented pairs). For this analysis we used a slightly lower voxel-level threshold ( $p < 0.005$ ). For pictures we found identity priming greater than mirror priming in bilateral occipito-temporal posterior regions (right:  $45, -69, 3; Z = 5.12$ ; 490 voxels; left:  $-42, -81, -3; Z = 4.42$ ; 173 voxels). For letters, the interaction was found in the left posterior occipito-temporal region ( $-45, -78, 6; Z = 3.83$ ; 23 voxels), right occipito-temporal cortex ( $42, -63, -9; Z = 3.61$ ; 106 voxels) and left parietal region ( $-27, -60, 51; Z = 3.19$ ; 36 voxels). Crucially, the triple interaction (orientation [mirror>normal]  $\times$  repetition [different>same]  $\times$  category [letters>pictures]) showed a significant effect at the VWFA site ( $-36, -57, -18; Z = 2.99$ ; 6 voxels) indicating greater mirror priming than

identity priming for letters than for pictures in this region (Fig. 4B). Using a small-volume correction with ROIs as previously described, this triple-interaction effect reached significance both when searching around the *a priori* coordinates of the VWFA ( $p = 0.02$  FDR-corrected) and also within the functional ROI from our previous study ( $p = 0.03$ , FDR-corrected). Thus, this restricted area in left occipito-temporal cortex showed greater mirror image discrimination for letters than for pictures.

For pictures, we further examined possible differences in the magnitude of repetition reduction between pictures with an internal axis of symmetry (e.g. and ) and pictures that are intrinsically asymmetric (e.g. and ) . This analysis was motivated by the possibility that mirror-identity could be easier to detect in the former than in the latter, which are more similar to the letters we used. However this additional analysis showed that no brain region showed significant differences between these two subcategories (inclusively masked at  $p < 0.05$  by the main effect of repetition suppression for pictures).

In order to compare the magnitude of repetition suppression between single letters and whole words in the VWFA, we performed a joint analysis of the present data and our previous dataset with whole-word stimuli (Dehaene et al., 2010). We constructed a new ANOVA comprising within-subject factors of repetition (same or different prime) and orientation of the first stimulus (normal or mirror) and a between-subject factor of length (letters or words). We found a stronger response ~10 mm anterior to the classical VWFA coordinates for the triple interaction between repetition  $\times$  category (words or letters)  $\times$  orientation ( $-42, -45, -9; Z = 5.89$ ;  $p < 0.001$ , FDR-corrected for the brain volume). Therefore, at this site, mirror discrimination was greater for words than for single letters.

## Discussion

In the present study, we provided direct evidence with a priming fMRI paradigm that the VWFA exhibits a sensitivity to the left-right orientation of single letters, i.e., an early and elementary stage of visual word recognition, while this was not the case for nonalphabetic pictures of equivalent complexity (simple iconic images).

At the behavioural level, we observed only a non-significant trend for smaller mirror priming for letters than for pictures, possibly reflecting the fact that behavioural measures can be less sensitive than direct brain-evoked responses (Naccache and Dehaene, 2001). The fMRI results, however, reflected the expertise of good readers to

detect single letters in a fixed orientation, which does not happen for other kinds of images in general. Our fMRI results support the idea that the VWFA plays a crucial role in the specific discrimination of letter orientation in literate adults. Together with a previous fMRI study from our group (Dehaene et al., 2010) the present work provides further evidence supporting the participation of this restricted region in mirror-orientation discrimination for both letters and words. This finding does not necessarily contradict the “local combination detector” (LCD) model of reading, which assumes a hierarchical coding of letters, bigrams, morphemes and short words within partially distinct sectors of ventral visual cortex (Dehaene et al., 2005), as supported by fMRI activation and priming experiments (Dehaene et al., 2004; Vinckier et al., 2007). First, when reanalyzing together the words and letters experiments, we did find stronger mirror-discrimination for words than for letters in a region just anterior to the VWFA, consistent with the proposed ventral gradient. Second, neurophysiological recordings suggest that multiple stimulus dimensions may be encoded by intermingled or even identical neurons (Freiwald et al., 2009), compatible with the observed overlap of activations in experiments with letters and with words. The possibility that putative neural detectors for letter, bigram and morphemes are partially intermingled within a given subject is compounded by the fact that all our analyses are performed at the group level, thus obliterating any high-resolution information about the precise spatial distribution of cortical responses.

A possible alternative interpretation of the findings is that the left occipito-temporal cortex was modulated in a top-down manner by higher-order language areas, as suggested for instance by Kherif et al. (2010). According to this interpretation, priming in our experiment would be mediated by top-down feedback from a higher-level representation of the name of the prime onto the subsequent target. Letters would be more strongly associated with their names in canonical than in mirror orientation, while pictures would not show such an orientation difference, thus explaining the asymmetry in mirror priming. Although we cannot completely rule out this alternative interpretation, our experiment was designed to minimize the role of top-down effects arising from language areas. First, we opted for a neutral non-linguistic task (visual feature decision), which could be performed equally well with letters, mirror-letters and pictures. Second, we selected a short presentation of the prime (50 ms) associated with a very short prime-target SOA (100 ms). We did not use masked primes because it is unclear whether they can cause mirror priming (Bar and Biederman, 1998) and because the present design was kept identical to a previous fMRI study on mirror-image recognition (Dehaene et al., 2010). Still, our tasks and short presentation times should have minimized late-stage attentional, top-down or strategic effect on prime processing (although Kherif et al. (2010) do leave open the possibility that some top-down influence may have remained). Note also that our whole-brain scans do not provide any evidence that mirror-priming arose from a region outside the ventral visual system, as the left occipito-temporal area was the only region showing such priming, and areas typically involved in naming were not observed (see Fig. 3B).

There is evidence that left-right mirror invariance is deeply entrenched in the ventral visual pathway of all primates, as inferior temporal cortex neurons in monkeys show such an invariance even when using abstract geometric forms as stimuli: neurons that respond preferentially to a given picture also respond in a nearly-equivalent manner to their mirror counterpart, but not to other viewpoints (Logothetis et al., 1995; Rollenhagen and Olson, 2000; Baylis and Driver, 2001). Moreover, mirror invariance was also demonstrated in infants (Bornstein et al., 1978) and may therefore constitute a default invariance of the visual system in humans. As a consequence, it is not surprising that young readers confuse left and right orientation of letters. However, after a couple of years of training they become able to read and write in the correct orientation (Cornell, 1985).

Remarkably, children within the normal range of intelligence but presenting specific difficulty in learn to read (dyslexics) often show a delay in the acquisition of the correct orientation of single letters (Terepocki et al., 2002), resulting in a paradoxical better-than-normal performance in same-different tasks when mirror letters should be assigned as “same” (Lachmann and van Leeuwen, 2007). Thus, all the evidence converges to the idea that the early stage of the visual system is one of mirror invariance.

When one learns to read, however, letters should be recognized in a fixed orientation, forcing the visual system to discriminate their orientations in an effortful manner. Longcamp et al. (2008) suggest that a movement code for handwriting gestures, particularly involving the bilateral inferior parietal lobule, may help in disambiguating symmetrical letters. Once reading expertise sets in, the recognition of letters in a fixed orientation (mirror discrimination) becomes automatic and effortless. What is the neuronal mechanism behind this automaticity? The present fMRI results, using short visual primes, indicate that the ventral visual pathway, and precisely the left visual word form, in skilled readers, is the primary site for such efficient left-right discrimination abilities, both for letters and for written words (Dehaene et al., 2010). This finding is strongly convergent with another source of data coming from studies of brain-lesioned patients. Indeed, neuropsychological data suggest that, in expert readers, the visual recognition of mirror images involves distinct neural systems for letters and written words than for other non-linguistic visual objects. Some patients, following parieto-occipital lesions, suffer from a specific visual left-right orientation agnosia, i.e., they become unable to distinguish the left-right orientation of objects, even though they are still able to recognize them (Turnbull and McCarthy, 1996; Davidoff and Warrington, 2001; Priftis et al., 2003; Vinckier et al., 2006). Remarkably, mirror discrimination of letters/words is perfectly intact in these patients. Thus, in skilled readers the dorsal stream may not be necessary for mirror discrimination for this special class of linguistic visual objects. One may speculate that at the beginning of learning to read, the dorsal system probably has an important role in disambiguating the orientation of alphabetic symbols, but after substantial exposure to them in a fixed orientation, the dorsal system is no longer necessary to this task, as the ventral system encodes the orientation of letters. Such a dorsal-to-ventral shift underlying the sensitivity to letter orientation would be consistent with the view that, in the initial stage of learning to read, left-right discrimination of letters is primarily guided by motor representations of handwriting acts encoded in parietal and motor/premotor areas (Longcamp et al., 2008). This hypothesis, however, remains to be directly tested.

Another important open question concerns the impact of the acquisition of reading on other cognitive skills. More precisely, does mirror orientation discrimination in the alphabetic domain transfer to other visual categories? The answer seems to be, at least partially, yes. Preschoolers and illiterate adults are reported to be specifically impaired in discriminating the orientation of abstract non-alphabetic shapes such as an equilateral triangle (Kolinsky et al., 1987). More surprisingly, Pederson, Danziger and colleagues provided behavioural evidence of the inability to discriminate mirror orientation of geometric shapes in literate adults of the Tamil script, a writing system where no mirror pairs like “b” and “d” or “p” and “q” are present. In contrast, mirror discrimination skills emerged in literate readers who mastered both Tamil and Latin alphabets (Danziger and Pederson, 1998; Pederson, 2003). Danziger and Pederson suggest that the attentional process necessary to distinguish these frequent mirror letters would be the basis for mirror-discrimination ability in readers of the Latin alphabet.

In support of this notion, a role for attention in left-right discrimination of non-alphabetic shapes has been evoked in behavioural and fMRI studies (Stankiewicz et al., 1998; Eger, 2004;

Vuilleumier et al., 2005). The general conclusion of such studies seems to be that both view-invariant and view-dependent representations can be evoked when the subjects are attentive to the stimuli. This conclusion is compatible with our observation of both view-specific, same-orientation priming in large-chunks of bilateral posterior occipito-temporal cortex, and view-independent, mirror-orientation priming at the VWFA site. In the reading domain, there is evidence of a priming effect for mirror words in the VWFA (Lin and Ryan, 2007; Ryan and Schnyer, 2007) when effortful mirror reading tasks were used. In our study, we used a very short presentation paradigm in order to minimize strategic influences. Altogether, these results therefore suggest that mirror discrimination for single letters happens in an automatic way, as was the case in our previous study using whole words (Dehaene et al., 2010), while mirror invariance no longer occurs automatically for mirror letters in expert readers unless effortful mirror reading strategies are deployed.

The neural mechanisms of mirror generalization for pictures remain to be elucidated. Some authors argue that the mirror invariance process is grounded in the symmetrical arrangement of connections across the two hemispheres, as suggested first by Orton in beginning of the 20th century and then refined by Corballis and Beale (1976). Inter-hemispheric connections through the corpus callosum, linking symmetrically regions of each hemisphere point by point, would operate in such a way that a "b" in one hemisphere would become a "d" in the other (Corballis and Beale, 1976; Dehaene, 2009). Others authors (Rollenhagen and Olson, 2000; Davidoff and Warrington, 2001) stress that mirror discrimination, for identification purposes, does not represent any evident advantage in a natural world when the vast majority of living and non-living forms do not change category under mirror symmetry. It is therefore plausible that the orientation information is simply not coded at all, so that separate representations of original and mirror representations do not exist, which seems coherent with single neuron monkey data (Logothetis et al., 1995; Rollenhagen and Olson, 2000). For letters, however, such distinct representations would have been created, for instance based on the necessity to map them onto distinct phonological or gesture-based codes in higher areas.

Finally, a more fundamental question that deserves attention concerns the phylogenetic and ontogenetic origins of this particular region of the left occipito-temporal cortex (Dehaene, 2009). Why is this specific region the site of both alphabetic learning, and maximal mirror invariance for objects? What was the role of the VWFA before the relatively recent cultural invention of reading and writing? What is the function of this structure before learning to read, and how does it behave in mature but illiterate adults? While the answer to these questions remains open, concerning specifically the issue of mirror orientation, our research predicts that in pre-school children as in adult illiterates, the VWFA may present mirror generalization for pictures but also for single letters and perhaps even for written words. This prediction should be assessed in future studies.

## Acknowledgments

This research was funded by INSERM, CEA, Collège de France, University Paris XI and an Agence Nationale de Recherche (ANR) grant to SD and LC. KN was supported by the Sumitomo Foundation. We would like to thank Antoinette Jobert, Ghislaine Dehaene-Lambertz, Denis Le Bihan, Lucie Hertz-Pannier, Andreas Kleinschmidt, Caroline Huron and the LBIOM team of the NeuroSpin Center for their help at various stages of this research.

## References

- Bar, M., Biederman, I., 1998. Subliminal visual priming. *Psychol. Sci.* 9, 464–468.
- Baylis, G.C., Driver, J., 2001. Shape-coding in IT cells generalizes over contrast and mirror reversal, but not figure-ground reversal. *Nat. Neurosci.* 4, 937–942.
- Biederman, I., Cooper, E.E., 1991. Evidence for complete translational and reflectional invariance in visual object priming. *Perception* 20, 585–593.
- Bornstein, M.H., Gross, C.G., Wolf, J.Z., 1978. Perceptual similarity of mirror images in infancy. *Cognition* 6, 89–116.
- Cohen, L., Dehaene, S., Naccache, L., Lehéricy, S., Dehaene-Lambertz, G., Hénaff, M.A., Michel, F., 2000. The visual word form area: spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. *Brain* 123 (Pt 2), 291–307.
- Cohen, L., Lehéricy, S., Chochon, F., Lemer, C., Rivaud, S., Dehaene, S., 2002. Language-specific tuning of visual cortex? Functional properties of the Visual Word Form Area. *Brain* 125, 1054–1069.
- Corballis, M.C., Beale, I., 1976. The Psychology of Left and Right. Erlbaum, New York.
- Cornell, 1985. Spontaneous mirror-writing in children. *Can. J. Exp. Psychol.* 39, 174–179.
- Danziger, E., Pederson, E., 1998. Through the looking glass: literacy, writing systems and mirror-image discrimination. *Written Lang. Literacy* 1, 153–169.
- Davidoff, J., Warrington, E.K., 2001. A particular difficulty in discriminating between mirror images. *Neuropsychologia* 39, 1022–1036.
- Dehaene, S., 2009. Reading in the Brain. Penguin Viking.
- Dehaene, S., Jobert, A., Naccache, L., Ciuci, P., Poline, J.B., Le Bihan, D., Cohen, L., 2004. Letter binding and invariant recognition of masked words. Behavioral and neuroimaging evidence. *Psychol. Sci.* 15, 307–313.
- Dehaene, S., Cohen, L., Sigman, M., Vinckier, F., 2005. The neural code for written words: a proposal. *Trends Cogn. Sci.* 9, 335–341.
- Dehaene, S., Nakamura, K., Jobert, A., Kuroki, C., Ogawa, S., Cohen, L., 2010. Why do children make mirror errors in reading? Neural correlates of mirror invariance in the visual word form area. *Neuroimage* 49, 1837–1848.
- Eger, E., 2004. BOLD repetition decreases in object-responsive ventral visual areas depend on spatial attention. *J. Neurophysiol.* 92, 1241–1247.
- Fiser, J., Biederman, I., 2001. Invariance of long-term visual priming to scale, reflection, translation, and hemisphere. *Vis. Res.* 41, 221–234.
- Freiwald, W.A., Tsao, D.Y., Livingstone, M.S., 2009. A face feature space in the macaque temporal lobe. *Nat. Neurosci.* 12, 1187–1196.
- Graves, W.W., Desai, R., Humphries, C., Seidenberg, M.S., Binder, J.R., 2010. Neural systems for reading aloud: a multiparametric approach. *Cereb. Cortex* 20, 1799–1815.
- Hollard, V., Delius, J., 1982. Rotational invariance in visual pattern recognition by pigeons and humans. *Science* 218, 804–806.
- Kherif, F., Josse, G., Price, C.J., 2010. Automatic top-down processing explains common left occipito-temporal responses to visual words and objects. *Cereb. Cortex* 20, bhq063v1-bhq063.
- Kolinsky, R., Morais, J., Content, A., Cary, L., 1987. Finding parts within figures: a developmental study. *Perception* 16, 399–407.
- Lachmann, T., van Leeuwen, C., 2007. Paradoxical enhancement of letter recognition in developmental dyslexia. *Dev. Neuropsychol.* 31, 61–77.
- Lin, C.Y., Ryan, L., 2007. Repetition priming without identification of the primes: evidence for a component process view of priming. *Neuroimage* 38, 589–603.
- Logothetis, N.K., Pauls, J., Poggio, T., 1995. Shape representation in the inferior temporal cortex of monkeys. *Curr. Biol.* 5, 552–563.
- Longcamp, M., Boucard, C., Gilhodes, J.C., Anton, J.L., Roth, M., Nazarian, B., Velay, J.L., 2008. Learning through hand- or typewriting influences visual recognition of new graphic shapes: behavioral and functional imaging evidence. *J. Cogn. Neurosci.* 20, 802–815.
- Maurer, U., Zevin, J.D., McCandliss, B.D., 2008. Left-lateralized N170 effects of visual expertise in reading: evidence from Japanese syllabic and logographic scripts. *J. Cogn. Neurosci.* 20, 1878–1891.
- McCandliss, B., 2003. The visual word form area: expertise for reading in the fusiform gyrus. *Trends Cogn. Sci.* 7, 293–299.
- Mello, N.K., 1965. Interhemispheric reversal of mirror-image oblique lines after monocular training in pigeons. *Science* 148, 252–254.
- Naccache, L., Dehaene, S., 2001. The priming method: imaging unconscious repetition priming reveals an abstract representation of number in the parietal lobes. *Cereb. Cortex* 11, 966–974.
- Nakamura, K., Dehaene, S., Jobert, A., Le Bihan, D., Kouider, S., 2005. Subliminal convergence of Kanji and Kana words: further evidence for functional parcellation of the posterior temporal cortex in visual word perception. *J. Cogn. Neurosci.* 17, 954–968.
- Pederson, E., 2003. Mirror-image discrimination among nonliterate, monoliterate, and biliterate Tamil subjects. *Written Lang. Literacy* 6, 71–91.
- Pritis, K., Rusconi, E., Umiltà, C., Zorzi, M., 2003. Pure agnosia for mirror stimuli after right inferior parietal lesion. *Brain* 126, 908–919.
- Rollenhagen, J.E., Olson, C.R., 2000. Mirror-image confusion in single neurons of the macaque inferotemporal cortex. *Science* 287, 1506–1508.
- Ryan, L., Schnyer, D., 2007. Regional specificity of format-specific priming effects in mirror word reading using functional magnetic resonance imaging. *Cereb. Cortex* 17, 982.
- Schott, G.D., 2007. Mirror writing: neurological reflections on an unusual phenomenon. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry* 78, 5–13.
- Stankiewicz, B.J., Hummel, J., Cooper, E., 1998. The role of attention in priming for left-right reflections of object images: evidence for a dual representation of object shape. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 24, 732–744.
- Sutherland, N., 1960. Theories of shape discrimination in octopus. *Nature* 186, 840–844.
- Tarr, M.J., Pinker, S., 1989. Mental rotation and orientation-dependence in shape recognition. *Cogn. Psychol.* 21, 233–282.
- Teperekci, M., Kruk, R.S., Willows, D.M., 2002. The incidence and nature of letter orientation errors in reading disability. *J. Learn. Disabil.* 35, 214–233.

- Turnbull, O., McCarthy, R., 1996. Failure to discriminate between mirror-image objects: a case of viewpoint-independent object recognition? *Neurocase* 2, 63–72.
- Vinckier, F., Naccache, L., Papeix, C., Forget, J., Hahn-Barma, V., Dehaene, S., Cohen, L., 2006. "What" and "where" in word reading: ventral coding of written words revealed by parietal atrophy. *J. Cogn. Neurosci.* 18, 1998–2012.
- Vinckier, F., Dehaene, S., Jobert, A., Dubus, J., Sigman, M., Cohen, L., 2007. Hierarchical coding of letter strings in the ventral stream: dissecting the inner organization of the visual word-form system. *Neuron* 55, 143–156.
- Vuilleumier, P., Schwartz, S., Duhoux, S., Dolan, R.J., Driver, J., 2005. Selective attention modulates neural substrates of repetition priming and "implicit" visual memory: suppressions and enhancements revealed by fMRI. *J. Cogn. Neurosci.* 17, 1245–1260.

### ***Expérience 3: L'invariance en miroir chez les lettrés, illettrés et ex-illettrés (étude comportementale)***

Cette même question de l'impact de l'alphabétisation sur l'invariance en miroir (voir partie I, chapitre 2 et l'introduction de l'expérience 2) a été abordée dans une étude comportementale chez les mêmes sujets illettrés, ex-illettrés et lettrés ayant participé à nos études en IRMf et EEG (en préparation). Les mêmes stimuli ont également été utilisés.

Pour cette tâche, des paires de stimuli ont été présentées aux sujets, qui devaient donner un jugement égal/different portant sur l'identité, sans prendre en compte l'orientation. Ils devraient utiliser le bouton droit pour répondre « égal » aux paires identiques et le bouton de gauche pour assigner « différent » pour les paires distinctes (de la même catégorie visuelle). Enfin, pour les paires égales mais inversées en miroir, les participants devraient répondre « égal » (jugement d'identité).

Nous avons utilisé des stimuli représentant des visages, des maisons, des outils, des pseudo-mots et des fausses polices. Chez les lettrés, les résultats ont montré une discrimination automatique de l'orientation des pseudo-mots et des fausses polices et même, à un moindre degré, aux autres catégories de stimuli, suggérant donc un certain transfert de cette capacité discriminatoire en dehors du domaine de la lecture. Les illettrés en contrepartie, ont présenté un patron de réponses invariant en miroir à travers toutes les catégories. De façon surprenante, les ex-illettrés, même si alphabétisés tardivement et présentant un niveau rudimentaire de lecture, ont montré un patron de réponses semblable à celui des lettrés : une discrimination automatique de l'orientation pour les stimuli du domaine de la lecture et un transfert partiel vers les catégories non-alphabétiques. Ces résultats suggèrent que même un apprentissage tardif de la lecture peut avoir un impact profond sur des mécanismes cérébraux bien établis au cours de l'évolution.

Title:

**Literacy breaks mirror invariance for visual stimuli:  
a behavioral study with adult illiterates**

Authors:

Felipe Pegado<sup>1,2,3</sup>, Kimihiro Nakamura<sup>1,2,3,4</sup>, Lucia W. Braga<sup>5</sup>, Paulo Ventura<sup>6</sup>, Gilberto Nunes Filho<sup>5</sup>, Antoinette Jobert<sup>1,2,3</sup>, José Morais<sup>7,8</sup>, Laurent Cohen<sup>9,10</sup>, Régine Kolinsky<sup>7,8</sup>, Stanislas Dehaene<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup> INSERM, Cognitive Neuroimaging Unit, Gif sur Yvette, 91191 France

<sup>2</sup> CEA, DSV, I2BM, Neurospin center, Gif sur Yvette, 91191 France

<sup>3</sup> University Paris 11, Orsay, France

<sup>4</sup> Collège de France, 11 Place Marcelin Berthelot, 75005 Paris, France

<sup>5</sup> SARAH Hospital, Brasilia, Brazil

<sup>6</sup> Faculty of Psychology, University of Lisbon, Portugal

<sup>7</sup> Faculty of Psychology, Université Libre de Bruxelles (U.L.B.), Brussels, Belgium

<sup>8</sup> Fonds de la Recherche Scientifique-FNRS

<sup>9</sup> Université Pierre et Marie Curie-Paris 6, Faculté de Médecine Pitié-Salpêtrière, Paris, France

<sup>10</sup> AP-HP, Groupe hospitalier Pitié-Salpêtrière, Department of Neurology, Paris, France

**Abstract:** The ability to recognize left-right mirror images as identical, despite a distinct retinal configuration, is present in humans and other primates. In order to read, however, one must discriminate the left-right orientation of letters and distinguish, for instance, b from d. We therefore predicted that literacy may entail a loss in mirror invariance. Here, we manipulated the orientation of letter string, false-font and pictural stimuli in a same-different task requiring identity judgments regardless of orientation (i.e., respond “same” to mirror pairs such as “iblo oldi”). Literates presented clear difficulties with mirror invariance (slowed responses and increased errors). This effect was strongest with letters strings but was also observed with false-fonts and even with pictures. In contrast, illiterates did not present any cost for mirror pairs. Interestingly, ex-illiterates (alphabetized in adulthood) did exhibit a mirror cost, suggesting that modest reading practice, late in life, can suffice to break mirror invariance.

## Introduction

Could you tell whether the left or right side of Einstein's face appears in his legendary tongue-out photography? In our visual recognition memory, left-right orientation is often missing. This mirror invariance has been demonstrated in humans (Biederman & Cooper, 1991; Stankiewicz, Hummel, & Cooper, 1998) and non-human species (Logothetis, Pauls, & Poggio, 1995; Noble, 1966; Rollenhagen & Olson, 2000), suggesting an old phylogenetic origin or convergent evolution.

In nature, indeed, left-right mirror discrimination is unlikely to be of relevance. On the contrary, mirror invariance can represent an advantage for learning and survival, by enabling one to immediately recognize the mirrored version of previously exposed images (e.g., a predator), despite very different retinal configurations. However, to read and write, mirror discrimination is needed to avoid confusing b with d or p with q. Interestingly, children who are just beginning to read and write frequently present mirror confusions, which normally disappear after approximately two years of literacy training (Cornell, 1985). In dyslexic children, mirror confusion takes longer to disappear, and dyslexics may even present a paradoxically *better* performance than normal readers in a same-different mirror-invariance task where mirror letters should be assigned the response "same" (Lachmann & van Leeuwen, 2007).

Neuroimaging studies have shown that a restricted area in the left temporo-occipital cortex, namely the Visual Word Form Area (VWFA), responds in a robust way to orthographic stimuli, across different written systems (Bolger, Perfetti, & Schneider, 2005). Literacy increases the activation of this region to letter strings, while slightly decreasing its activation to faces and other visual stimuli (Dehaene, Pegado, et al., 2010b). Importantly, in

literate adults, this region presents mirror invariance for pictures, but mirror discrimination for letters (Pegado, Nakamura, Cohen, & Dehaene, 2011) and words (Dehaene et al., 2010a).

These findings suggest that literacy may be directly responsible for the loss of mirror discrimination in this area, leading to a simple prediction: in a same-different task requiring mirror invariance, literates might perform *worse* than illiterates.

In the present work we directly tested this predicted influence of literacy on mirror invariance. The same literate, illiterate and ex-illiterate adult participants who took part in our earlier fMRI work (Dehaene et al., 2010b) performed a same-different identity task where the left-right orientation of stimuli was manipulated, separately for alphabetic, false-font and pictural stimuli.

## Method

### Participants

We tested a group of 10 adult Brazilian illiterates (mean age 53.3, range 44-64) who had not been schooled, could not read simple words and, and even failed to identify some letters. They were compared to Brazilian and Portuguese literates (n=32) and ex-illiterates (alphabetized in adulthood; n=21) with variable reading skills. Detailed behavioural performance measures and socio-demographical data are described elsewhere (Dehaene et al., 2010b). Out of the original dataset of 63 participants, two literates did not take this test. In the remaining sixty-one subjects, two other literate subjects were excluded from the analysis for failing to apply the instructions. A subset of 31 Brazilian subjects (called ILB, EXB and LB2 in Dehaene et al., 2010b) was matched for origin, age, and socio-economic status, and we verified that our ANOVA results still held when analyzing just these subgroups (see figure S2 and results of this supplementary analysis in supporting information available on-line).

## **Same-different task**

Five categories of visual stimuli were intermixed in random order: letter strings, false-fonts, and three pictorial categories (faces, houses and tools). Stimuli were presented sequentially as pairs which could be physically identical, left-right mirrored, or different (figure 1; for simplicity, we only studied invariance for reflection around the vertical axis; but see L. Cohen, Dehaene, Vinckier, Jobert, & Montavont, 2008; Gregory & McCloskey, 2010; Kung & Hamm, 2010). Subjects judged if the pairs were same or different, pressing the right or left button respectively. They were carefully instructed to respond "same" to mirror pairs (identity judgement regardless of orientation). 10 trials were presented for each of the five visual categories and each of the three repetition types (same, different and mirror), for a total of 150 trials per subject.

Materials are described thoroughly in Dehaene et al., 2010b, and in supporting information available on-line (examples appear in figure S1). In the string category, we used pseudowords instead of real words to avoid lexical-semantic interference. The pseudo-words were 4-letter strings such as “obli”, written exclusively with the lowercase letter set ‘bdmnpqiou’, and using a modified Arial font where letters were strictly reversible, so that after mirroring the stimuli still looked like possible pseudo-words. Each comprised one and only one asymmetric letter (b, d, p or q). False-font stimuli were matched one-to-one with the pseudowords, replacing each letter with a pseudo-letter of similar complexity. Within each category, the “different” pairs were created by pairing each exemplar with another maximally different one (see Supplementary Materials for details). For strings, the “different” pairs shared, on average, 0.21 letters at the same location (out of 4 letters).

## Results

We collapsed faces, tools and house into a single picture-category after ANOVA revealed no significant interactions with group or repetition.

### Response Times (RTs)

Unsurprisingly, illiterates responded overall more slowly than literates (1137 vs 745ms;  $F(1,36)=62.7, p<0.0001$ ) and the illiterate RTs were not significantly different across categories ( $F(2,18)<1$ ). Interestingly however, a significant category-by-group interaction  $F(2,72)=6.1, p<0.005$ ) showed that this between-group difference was less pronounced for strings (1049 vs 861 ms) than for false-fonts (1216 vs 858 ms) or pictures (1140 vs 669 ms). This finding provides a first indication that the mirror-invariance task was particularly difficult for literates with mirrored strings (Figure 2a). When compared to ex-illiterates , illiterates again responded more slowly (710ms vs 1137ms,  $F(1,29)=12.6, p<0.005$ ), but this group difference again varied with category (1049 vs 807 ms for strings, 1216 vs 809 ms for false-fonts, 1140 vs 645ms for pictures), although the category-by-group interaction presented only a trend ( $F(2,58)=2.7, p=0.08$ ). Note that ex-illiterates responded only 30 ms faster than literate subjects, a non-significant difference ( $F(1,47)<1$ ) that did not change with category ( $F(2,94)<1$ ), suggesting that late alphabetization effectively allowed ex-illiterates to match the overall performance level of the literates.

We then turned to mirror discrimination effects. To address the main goal of our study (automatic mirror discrimination), we examined the additional cost of assigning the “same” response to mirror pairs relative to identical pairs, and how this cost varied with literacy and stimulus category. The literate group exhibited a significant delay for mirror relative to identical trials, with a 128 ms difference for pictures ( $F(1,27)=79.0, p<0.0001$ ), 306 ms for false-fonts ( $F(1,27)=33.2, p<0.0001$ ) and 425 ms for strings ( $F(1,27)=37.0, p<0.0001$ )(see

figure 2A). Ex-illiterates also presented an additional cost for all categories, i.e., 116 ms for pictures ( $F(1,20)=43.8, p<0.0001$ ), 196 ms for false-fonts ( $F(1,20)=16.8, p<0.001$ ) and 247 ms for strings stimuli ( $F(1,20)=8.8, p=0.008$ ). In a clear contrast, illiterates did not exhibit an additional cost for strings, false-fonts or pictures ( $F(1,9)<1$  for each) . Moreover, their RTs for strings in ‘same’ or ‘different’ trials did not differ ( $F(1,9)=3.15; p>0.10$ ).

We then tested directly for group differences in mirror cost for each category, using a normalized index:  $(RT_{\text{mirror}} - RT_{\text{same}}) / (RT_{\text{mirror}} + RT_{\text{same}})$ . The literate group showed a greater mirror cost index than illiterates in all categories ( $F(1,36)=12.5, p<0.005$  for pictures;  $F(1,36)=17.0, p<0.0005$  for false-fonts and  $F(1,36)=16.5, p<0.0005$  for strings), although this group difference was larger for both strings ( $F(1,36)=20.5, p<0.0001$ ), and false-fonts ( $F(1,36)=21.8, p<0.0001$ ) relative to pictures. Interestingly, ex-illiterates relative to illiterates also showed a greater mirror cost index for strings ( $F(1,29)=5.8, p<0.03$ ), false-fonts ( $F(1,29)=7.1, p<0.03$ ) and pictures ( $F(1,29)=8.1, p<0.01$ ), although again the mirror cost index was greater for strings ( $F(1,29)=9.6, p<0.005$ ) and false-fonts ( $F(1,29)=10.2, p<0.005$ ) relative to pictures. Overall, the results indicate that early and late literacy relatively reduces the efficiency with which we judge two mirror images as “same”, especially for alphabet-like visual stimuli.

Because there was high variability in reading performance within each group, we also replicated the above analysis with a potentially more sensitive regression approach. We thus regressed each subject’s mirror cost index on reading fluency (number of words and pseudowords read per minute) (Figure 3). For strings, the mirror cost was strongly positively correlated with reading fluency ( $r^2= 23.6\%; p<0.0001$ ): the better readers were those who exhibited the strongest mirror interference. Such was also the case for false-fonts ( $r^2= 18.1\%$ ;  $p<0.001$ ). For pictures there was again a small but significant correlation ( $r^2= 7.7\%; p<0.05$ ) suggesting a partial transfer of the literacy effect on mirror discrimination to visual categories

irrelevant to reading. Interestingly, even when excluding illiterates, there was still a significant correlation between reading scores and the mirror cost for strings ( $r^2=15.9\%, p<0.005$ ) and false-fonts ( $r^2=8.5\%, p<0.05$ ) though no longer significantly for pictures ( $r^2=1.0\%, p>0.5$ ). Thus, the effect cannot be solely imputed to a distinct strategy or performance in illiterates, but reflects a continuous impact of increasing reading fluency on mirror invariance for strings and false-fonts. Note, however, that this analysis remains partially confounded with groups, since ex-illiterates showed on average a worse performance than literates in our sample. No significant correlation was found within either the ex-illiterate or literate groups, a null effect probably due to a lack of power.

### Error rates (ERs)

Consistent with RT data, illiterates did not show more errors, irrespective of stimulus category, in mirror relative to identical trials (strings:  $F(1,9)=1.6, p>0.2$ ; false-fonts:  $F(1,9)=1.6, p>0.2$ ; pictures:  $F(1,9)<1$ ). In contrast, ex-illiterates made more errors in mirror relative to identical trials, for strings ( $F(1,20)=22.6, p<0.0005$ ) and false-fonts ( $F(1,20)=22.7, p<0.0005$ ) but not for pictures ( $F(1,20)=1.46, p>0.2$ ). The same was true in literate group for strings ( $F(1,27)=54.3, p<0.0001$ ), false-fonts ( $F(1,27)=58.6, p<0.0001$ ) and pictures ( $F(1,27)=10.8, p<0.003$ ) even though error rates were very low in this category (3.1% for mirror and 0.8% for identical). We then computed the mirror cost index for error rates. For strings, literates presented a higher mirror cost than illiterates ( $F(1,36)=11.0, p=0.002$ ) but ex-illiterates did not differ from illiterates ( $F(1,29)=1.3, p>0.2$ ). Concerning false-fonts, literates again presented higher mirror cost than illiterates ( $F(1,36)=5.5, p<0.03$ ), and ex-illiterates versus illiterates were marginally distinct ( $F(1,29)=4.3, p=0.05$ ). Finally, for pictures, neither ex-illiterates nor literates differed from illiterates ( $F(1,29)<1$ ;  $F(1,36)=3.0, p>0.09$ ; respectively).

## Discussion

Our results suggest that learning to read impacts on mirror invariance in visual recognition, for letter strings but also false-fonts and even slightly for pictorial stimuli, suggesting a partial transfer of this culturally learned skill outside the familiar alphabetic domain. The effect observed with letter strings in literates might be due not only to visual familiarity, but also to additional influences arising from higher processing levels (e.g., phonological), given that a string and its mirror image also form distinct pseudo-words that are pronounced radically differently. However, no such explanation exists for false-font and pictorial stimuli, for which our same-different task specifically tapped an abstract, orientation-invariant level of visual representation. The fact that literate participants suffered from interference with mirror pairs therefore suggests that, with literacy, the visual system loses some of its mirror invariance and automatically encodes mirror-related stimuli as different. As a result, literates have to spend more time scrutinizing them before deciding that they are, indeed, the same.

Note that the presence of some identical letters in “different” trial pairs could have made the string category more difficult to judge. However, the results do not lean in this direction. Illiterates, for instance, show no difference in RT or error rate across the three categories of pictures, false fonts and strings, which was not the case for the other groups (see figure 2 and results). Furthermore, the stimulus set was identical for all subjects, and thus the observed variation in performance with literacy within the “same” trials cannot be imputed to the difficulty of the “different” trials.

Importantly, the fact that mirror interference was also found in ex-illiterates, who learned to read in adulthood, indicates that the acquisition of automatic mirror discrimination is specifically due to literacy, not just early schooling. It also implies the absence of a critical

period during childhood, as mirror invariance could be deteriorated by even limited training during adulthood.

Our results confirm and extend previous findings in normal and dyslexic children (Cornell, 1985; Lachmann & van Leeuwen, 2007) and in literate adults from different cultural backgrounds and writing systems (Danziger & Pederson, 1998; Pederson, 2003; Dehaene, Nakamura, et al., 2010a). Mirror invariance is well established in the primate nervous system, both from an ontogenetic point of view [starting as early as 4 months-old of age in humans (Bornstein, Gross, & Wolf, 1978)] and from the phylogenetic perspective, as explained earlier. Thus, it is remarkable that this mirror invariance can be *unlearned* for alphabetic stimuli. Such superseding of an older evolutionary mechanism may be considered as a by-product of a neuronal recycling induced by the novel cultural activity of reading (Dehaene & Cohen, 2007).

The negative effect of literacy should be properly qualified, however. First, with pictures, mirror invariance was only mildly affected and remained efficient in literates, as attested by their low error rate in this category, compatible with our finding of mirror invariance for pictures in the fusiform gyrus using fMRI (Pegado, Nakamura, Cohen, & Dehaene, 2011; Dehaene et al., 2010a). Second, the flip side of mirror-invariance unlearning is that illiterates experience difficulties in mirror discrimination, both for alphabetic and non-alphabetic stimuli, for instance in deciding that rightward- and leftward-pointing triangles are different (Danziger & Pederson, 1998; Dehaene, Izard, Pica, & Spelke, 2006; Kolinsky et al., 2011) and in discriminating mirror images of familiar objects like tools, furniture or clothes (Fernandes & Kolinsky (in prep.)). Finally, illiterates were overall much slower and more error prone than literates, suggesting a main positive effect of literacy acquisition on general visual function (Dehaene et al., 2010b) or the ability to carry out a response-time task.

Our study highlights how the perceptual organization in literates reflects the *relevance* of specific discriminations for reading. Mirror discrimination of letters is relevant to reading, and we show here how this discrimination becomes automatic and compulsory after reading acquisition, in parallel to the response of the VWFA (Dehaene et al., 2010a; Pegado et al., 2011). By contrast, discrimination of size, case, absolute location or spacing of letters is irrelevant for reading, and indeed previous behaviour and brain-imaging studies have showed invariant responses for these dimensions (Dehaene et al., 2005; Dehaene et al., 2001; Vinckier, Qiao, Pallier, Dehaene, & Cohen, in press). While past developmental studies have focussed primarily on the positive impact of phonological training, it might be worthwhile to examine whether preparing the pre-schoolers' visual system to reading, for instance by training them to distinguish mirror shapes, or to treat upper- and lower-case letters as identical, could facilitate literacy acquisition.

## References

- Beale, I. L., Williams, R. J., Webster, D. M., & Corballis, M. C. (1972). Confusion of Mirror Images by Pigeons and Interhemispheric Commissures. *Nature*, 238(5363), 348-349. doi:10.1038/238348a0
- Biederman, I., & Cooper, E. E. (1991). Evidence for complete translational and reflectional invariance in visual object priming. *Perception*, 20(5), 585-593. Consulté de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/gate2.inist.fr/pubmed/1806902>
- Bolger, D. J., Perfetti, C. A., & Schneider, W. (2005). Cross-cultural effect on the brain revisited: universal structures plus writing system variation. *Human Brain Mapping*, 25(1), 92-104. doi:10.1002/hbm.20124
- Bornstein, M. H., Gross, C. G., & Wolf, J. Z. (1978). Perceptual similarity of mirror images in infancy. *Cognition*, 6(2), 89-116. Consulté de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/679649>
- Cantlon, J. F., Pinel, P., Dehaene, S., & Pelpfrey, K. A. (2011). Cortical representations of symbols, objects, and faces are pruned back during early childhood. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 21(1), 191-199. doi:10.1093/cercor/bhq078
- Cornell. (1985). Spontaneous mirror-writing in children, 39, 174–179.
- Danziger, E., & Pederson, E. (1998). Through the looking glass: Literacy, writing systems and mirror-image discrimination. *Written language and literacy*, 1(2), 153-169.
- Dehaene, S, Cohen, L., Sigman, M., & Vinckier, F. (2005). The neural code for written words: a proposal. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(7), 335-341. doi:10.1016/j.tics.2005.05.004

- Dehaene, S., Jobert, A., Naccache, L., Ciuciu, P., Poline, J. B., Le Bihan, D., & Cohen, L. (2004). Letter Binding and Invariant Recognition of Masked Words. Behavioral and Neuroimaging Evidence. *Psychological Science*, 15(5), 307–313.
- Dehaene, S., Naccache, L., Cohen, L., Bihan, D. L., Mangin, J. F., Poline, J. B., & Rivière, D. (2001). Cerebral mechanisms of word masking and unconscious repetition priming. *Nature Neuroscience*, 4(7), 752–758.
- Dehaene, S., & Cohen, L. (2007). Cultural Recycling of Cortical Maps. *Neuron*, 56(2), 384–398. doi:10.1016/j.neuron.2007.10.004
- Dehaene, S., Izard, V., Pica, P., & Spelke, E. (2006). Core knowledge of geometry in an Amazonian indigene group. *Science (New York, N.Y.)*, 311(5759), 381-384. doi:10.1126/science.1121739
- Dehaene, S., Nakamura, K., Jobert, A., Kuroki, C., Ogawa, S., & Cohen, L. (2010a). Why do children make mirror errors in reading? Neural correlates of mirror invariance in the visual word form area. *NeuroImage*, 49(2), 1837-1848. doi:10.1016/j.neuroimage.2009.09.024
- Dehaene, S., Pegado, F., Braga, L. W., Ventura, P., Nunes Filho, G., Jobert, A., Dehaene-Lambertz, G., et al. (2010b). How learning to read changes the cortical networks for vision and language. *Science (New York, N.Y.)*, 330(6009), 1359-1364. doi:10.1126/science.1194140
- Fernandes & Kolinsky (in preparation) The role of literacy on enantiomorphy: from hand to eye.
- Freiwald, W. A., & Tsao, D. Y. (2010). Functional Compartmentalization and Viewpoint Generalization Within the Macaque Face-Processing System. *Science*, 330(6005), 845-851. doi:10.1126/science.1194908

- Kolinsky, R., Verhaeghe, A., Fernandes, T., Mengarda, E. J., Grimm-Cabral, L., & Morais, J. (2011). Enantiomorphy through the looking glass: Literacy effects on mirror-image discrimination. *Journal of Experimental Psychology. General*, 140(2), 210-238. doi:10.1037/a0022168
- Lachmann, T., & van Leeuwen, C. (2007). Paradoxical enhancement of letter recognition in developmental dyslexia. *Developmental neuropsychology*, 31(1), 61–77.
- Logothetis, N. K., Pauls, J., & Poggio, T. (1995). Shape representation in the inferior temporal cortex of monkeys. *Current Biology: CB*, 5(5), 552-563. Consulté de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7583105>
- Mello, N. K. (1965). Interhemispheric Reversal of Mirror-Image Oblique Lines after Monocular Training in Pigeons. *Science*, 148(3667), 252-254. doi:10.1126/science.148.3667.252
- Noble, J. (1966). Mirror-images and the forebrain commissures of the monkey. *Nature*, 211(5055), 1263-1266. Consulté de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/4961422>
- Pederson, E. (2003). Mirror-image discrimination among nonliterate, monoliterate, and biliterate Tamil subjects. *Written language and literacy*, 6(1), 71-91.
- Pegado, F., Nakamura, K., Cohen, L., & Dehaene, S. (2011). Breaking the symmetry: Mirror discrimination for single letters but not for pictures in the Visual Word Form Area. *NeuroImage*, 55(2), 742-749. doi:10.1016/j.neuroimage.2010.11.043
- Rollenhagen, J.E., & Olson, C.R. (2000). Mirror-Image Confusion in Single Neurons of the Macaque Inferotemporal Cortex. *Science*, 287(5457), 1506-1508. doi:10.1126/science.287.5457.1506
- Stankiewicz, B. J., Hummel, J., & Cooper, E. (1998). The role of attention in priming for left-right reflections of object images: Evidence for a dual representation of object shape.

*Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24, 732-744.

Sutherland, N. S. (1960). Visual discrimination of orientation by octopus: mirror images.

*British Journal of Psychology (London, England: 1953)*, 51, 9-18. Consulté de  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov.gate2.inist.fr/pubmed/13835827>

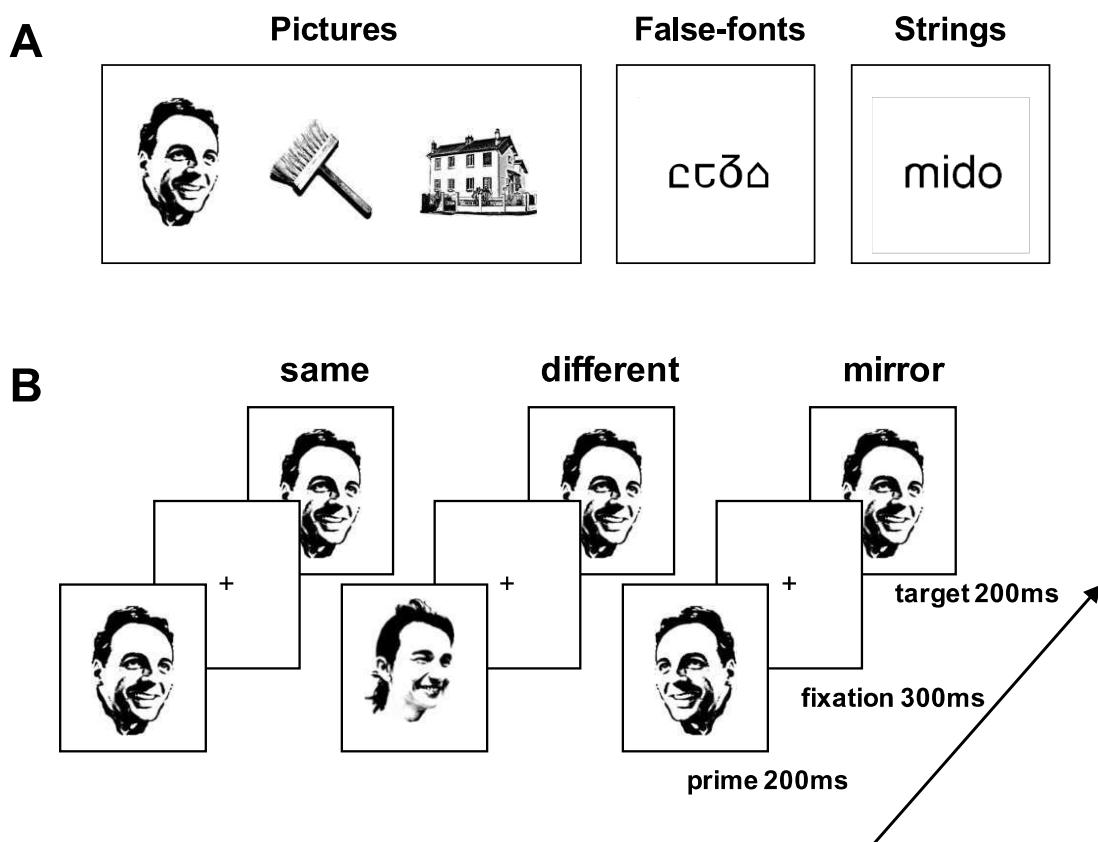
Vinckier, F., Dehaene, S., Jobert, A., Dubus, J., Sigman, M., & Cohen, L. (2007). Hierarchical Coding of Letter Strings in the Ventral Stream: Dissecting the Inner Organization of the Visual Word-Form System. *Neuron*, 55(1), 143-156.  
doi:10.1016/j.neuron.2007.05.031

Vinckier, Fabien, Qiao, E., Pallier, C., Dehaene, S., & Cohen, L. (in press). The impact of letter spacing on reading:a test of the bigram coding hypothesis. *Journal of Vision*.

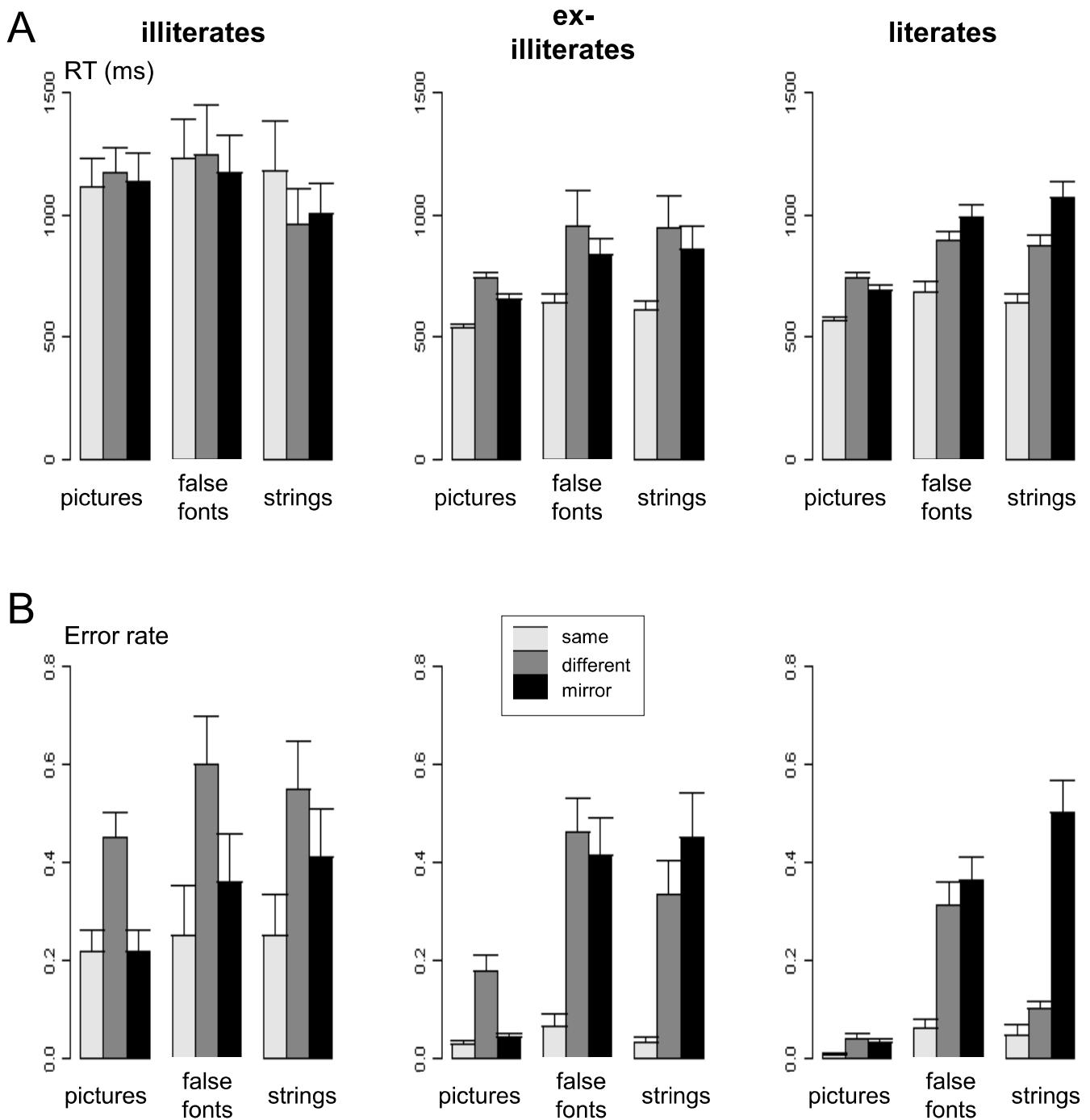
## **Acknowledgments**

We would like to thank Christoph Pallier, Luiz Querido, Christina Carvalho, and the team of Sarah Network (Brasilia- Brazil) for their help in this study. F.P. is supported by FRM (Fondation pour la Recherche Medicale)- France. KN was supported by the Sumitomo Foundation. PV is supported by an FCT grant (PTDC/PSI-PCO/099526/2008).

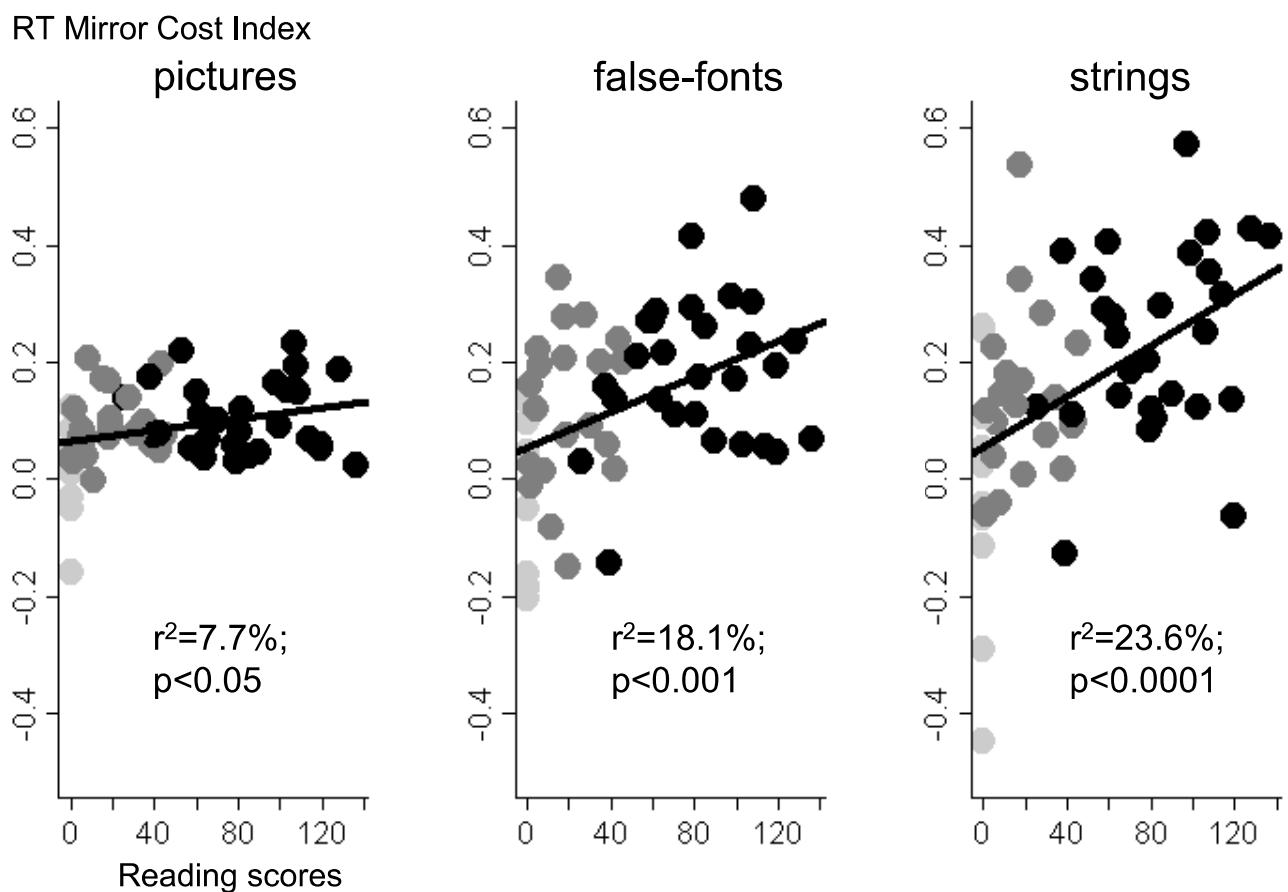
-  
06/11-342).



**Figure 1.** Experimental design. (A) Examples of the five stimulus categories used: pictures (faces, tools and houses), false-fonts, letter strings. (B) On each trial, a pair of stimuli was presented for 200ms each, separated by a 300ms interval. The relationship between the first and second stimuli could be: exactly the same (« same »), a different exemplar within the category (« different ») or a mirror reflection of the same exemplar (« mirror »). Subjects were asked to judge if the stimuli were the same or different exemplars, by pressing the right or left button respectively. They were carefully instructed to respond “same” to mirror pairs (identity judgment regardless of orientation).



**Figure 2.** Reaction times (A) and error rates (B) in the same-different task. Error bars represent one standard error of the mean.



**Figure 3.** Correlations between the response time mirror cost index [i.e.,  $(RT_{\text{mirror}} - RT_{\text{same}}) / (RT_{\text{mirror}} + RT_{\text{same}})$ ] and reading performance (average of words and pseudowords read per minute) for each of the three categories of stimuli. Literate subjects are plotted in black, ex-illiterates in dark grey and illiterates in light grey. Greater literacy is associated with a worse mirror cost, for strings and to a lesser extent for false-fonts and for pictures.

## **Supplementary Material:**

### **Material and Methods:**

Our stimuli set comprised 24 exemplars for each of the five visual categories presented in the study: faces, houses, tools, strings and false-fonts. Examples of each category are showed in figure S1.

All stimuli were black on a white background. Faces, houses and tools were highly contrasted gray-level photographs matched for size and overall luminance. Faces were frontal or slightly lateral views of non-famous people. Tools were common hand-held household objects (e.g. knife, hairdryer) presented in normal orientation. Houses comprised exterior pictures of common houses, apartments and buildings. Letter strings were pseudo-words, four letters long, made of the lower-case letters ‘bdmnpqiu’, and were orthographically legal in Portuguese. Other letters could not be used, because when presented in mirror image they would not have formed a possible pseudoword. Each of the 24 pseudowords comprised one and only one asymmetric letter (b, d, p or q) per stimuli, the other three being symmetric. A false font was designed in which the pseudo-letters were matched one-to-one in stroke complexity with the letters used in the pseudo-word stimuli. The 24 false font strings were generated by one-to-one replacement of the letters in the pseudo-word strings with the false-font letters. Strings and false-fonts were ~130 pixel wide x 40 pixel high or 4 x 1.2 degrees. The pseudo-words used in strings category were all mirror-reversible pseudo-words such as “obli/ildo”, written exclusively with the lowercase letter set ‘bdmnpqiu’, and using a slightly modified font where letters were strictly reversible, so that even in mirror image the stimuli still looked like possible pseudo-words.

Stimuli were presented sequentially as pairs which could be physically identical, left-right mirrored, or different. Subjects judged if the pairs were same or different, pressing the right or left button respectively.

In such a same-different task, the choice of “different” trials can have a considerable impact on strategy and performance. Here, to facilitate the task, we tried to maximize the difference between the exemplars presented on “different” trials.

In the face category, which comprised 13 male and 11 female faces, the “different” trials were formed by pairing each face with another very different one, thus forming 24 easily discriminable “different” pairs (13 of which had the same sex). 10 of these pairs were randomly chosen to be presented to a given subject as the “different” trials. The rationale for using only a subset of 10 pairs was to have the same overall stimulus set as the one used in our fMRI and ERPs studies, while restricting the duration of the present behavioral experiment for practical reasons (all studies were performed in the same day). The same information applies to the tools and house categories.

In the string category, each of the 24 pseudowords was paired with another one to create the “different” pairs. We tried to maximize letter dissimilarity between the two members of each pair, but it was impossible to fully exclude pairs of pseudowords sharing the same letters. In the end, the pairs exhibited quite a bit of variability in similarity on “different” trials, ranging from pairs such as “inpo / mubi” to others such as “obli / iqno” or “idum / oubi”. Quantitatively, the “different” pairs shared, on average, only 0.21 letters at the same location (out of 4 letters). Even after mirroring one of the two stimuli (as needed for the task, which requires responding “same” to mirror pairs such oubi/ido), the “different” pairs still only shared 1.08 letter at the same location. Finally, without considering location, the “different” pairs shared 1.83 letters on average. We never used as “different” stimuli two pseudowords that shared the same exact letter content but different only in letter order (e.g. oubi/ibou). Thus, it was always possible to respond “different” by spotting that at least one of the letters differed between the two pseudowords. 75% of the pairs also differed in the number of ascender (bdl), descender (pq) versus midline letters (mniou), thus creating a noticeable difference in overall contour of the two pseudowords.

Finally, the false-font stimuli were matched one-to-one with the pseudowords and hence were controlled in exactly the same manner.

Importantly, the stimulus set was the same for all three groups, and therefore in principle the difficulty induced by the choice of “different” trials was the same in all groups.

### **Supplementary Results: Additional analysis restricted to matched groups**

We provide here additional results obtained when restricting the analysis to a subset of 31 Brazilian subjects (called ILB, EXB and LB2 in Dehaene et al., 2010b) matched for origin, age, and socio-economic status. We closely follow the order in which these analyses are reported in the main text for the entire group of subject.

## Response Times (RTs)

Illiterates again responded overall more slowly (1137ms) than literates (797ms) ( $F(1,19)=19.4, p<0.001$ ). Interestingly, this between-group difference was less pronounced for strings (1049 vs 879 ms) than for pictures (1140 vs 729 ms), or false-fonts (1216 vs 921 ms), resulting in significant category-by-group interaction ( $F(2,38)=13.1, p<0.0001$ ) which gave a first indication that the mirror-invariance task was particularly difficult for literates with mirrored strings (Figure 2a). The illiterate RTs were, in fact, not significantly different across categories ( $F(2,18)<1$ ). When compared to ex-illiterates (819ms overall), illiterates were only marginally slower ( $F(1,18)=3.8, p=0.07$ ), and this group difference again varied with category (ex-illiterates: 967 ms for strings, 720ms for pictures, 969 ms for false-fonts), although the category-by-group interaction now presented only a trend ( $F(2,36)=2.7, p=0.08$ ). Note that ex-illiterates responded 20 ms slower than literate subjects, a non-significant difference ( $F(1,19)<1$ ) that did not change with category ( $F(2,38)=1.0$ ), suggesting that late alphabetization effectively allowed ex-illiterates to match the overall performance level of the literates.

We then turned to mirror discrimination effects. To address the main goal of our study (automatic mirror discrimination), we examined the additional cost of assigning the “same” response to mirror pairs relative to identical pairs, and how this cost varied with literacy and stimulus category. The literate group exhibited a significant delay for mirror relative to identical trials, with a 129 ms difference for pictures ( $F(1,10)=26.9, p<0.001$ ), 276 ms for false-fonts ( $F(1,10)=8.4, p<0.02$ ) and 258 ms for strings ( $F(1,10)=6.9, p<0.03$ ) (see figure 2A). Ex-illiterates also presented an additional cost for pictures (131 ms;  $F(1,9)=20.0, p<0.005$ ), false-fonts (242 ms;  $F(1,9)=12.8, p<0.006$ ) and strings (328 ms;  $F(1,9)=4.4, p=0.07$  marginally significant). In a clear contrast, illiterates did not exhibit an additional cost for strings, false-fonts or pictures ( $F(1,9)<1$  for each) .

Then we tested directly for group differences in mirror cost for each category, using a normalized index:  $(RT_{\text{mirror}} - RT_{\text{same}}) / (RT_{\text{mirror}} + RT_{\text{same}})$ . The literate group showed a greater mirror cost index than illiterates in all categories ( $F(1,19)=6.0, p<0.03$  for pictures;  $F(1,19)=7.4, p<0.02$  for false-fonts and  $F(1,19)=4.6, p<0.05$  for strings), although this group difference was larger for both strings ( $F(1,19)=6.7, p<0.02$ ), and false-fonts ( $F(1,19)=10.6, p<0.005$ ) relative to pictures. Interestingly, ex-illiterates relative to illiterates showed a greater mirror cost index for false-fonts ( $F(1,18)=6.7, p<0.03$ ), pictures ( $F(1,18)=5.3, p<0.05$ ) and marginally significant for strings ( $F(1,18)=4.1, p<0.06$ ), although

again the mirror cost index was greater for strings ( $F(1,18)=6.8, p<0.02$ ) and false-fonts ( $F(1,18)=8.9, p<0.01$ ) relative to pictures. Overall, the results indicate that early and late literacy relatively reduces the efficiency with which we judge two mirror images as “same”, specially for alphabetic related visual stimuli.

### **Regressions with reading fluency**

The reduced variability in reading fluencies within this restricted subgroup of participants render the regression approach rather insensitive. For pictures, the mirror cost was not significantly correlated with reading fluency ( $r^2= 5.1\%; p>0.2$ ). Such was also the case for strings ( $r^2= 4.8\%; p>0.2$ ). Only the mirror cost for false-fonts was strongly positively correlated with reading fluency ( $r^2= 21.3\%; p<0.01$ ).

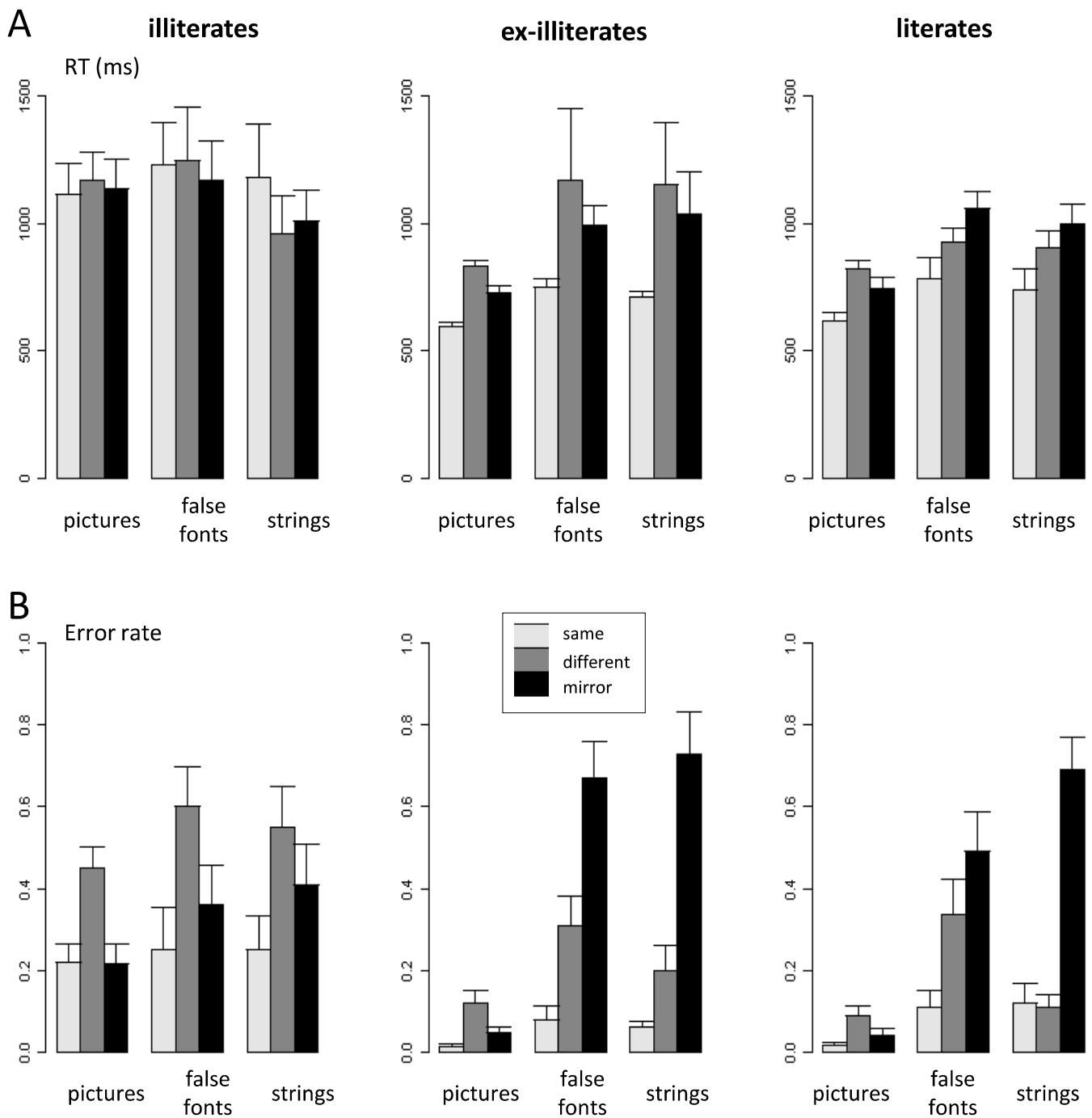
### **Error rates (ERs)**

Consistent with RT data, illiterates did not show more errors, irrespective of stimulus category, in mirror relative to identical trials (strings:  $F(1,9)=1.6, p>0.2$ ; false-fonts:  $F(1,9)=1.6, p>0.2$ ; pictures:  $F(1,9)<1$  ;). In contrast, ex-illiterates made more errors in mirror relative to identical trials, for strings ( $F(1,9)=38.0, p<0.0005$ ) and false-fonts ( $F(1,9)=44.2, p<0.0001$ ) but not for pictures ( $F(1,9)= 2.6, p>0.13$ ). The same was true in literate group for strings( $F(1,10)=54.5, p<0.0001$ ), false-fonts ( $F(1,10)=24.4, p<0.001$ ) and pictures ( $F(1,27)=5.4, p<0.05$ ) even though error rates were very low in this category (4.2% for mirror and 1.5% for identical). We then computed the mirror cost index for error rates. For strings, literates presented a higher mirror cost than illiterates ( $F(1,19)=6.2, p=0.02$ ) but ex-illiterates did not differ from illiterates ( $F(1,18)=2.1, p>0.16$ ). Concerning false-fonts, literates did not present a higher mirror cost than illiterates ( $F(1,19)=1.2, p>0.25$ ), but ex-illiterates were slightly worse than illiterates ( $F(1,18)=4.5, p<0.05$ ). Finally, for pictures, neither ex-illiterates nor literates differed from illiterates ( $F(1,18)=1.7, p>0.2$ ;  $F(1,19)=2.3, p>0.14$ ; respectively).



**Figure S1. Examples of stimuli used for each visual category.**

(A) faces; (B) houses; (C) Tools; (D) strings; (E) false-fonts.



**Figure S2.** Reaction times (A) and error rates (B) in the same-different task, restricted to groups matched for origin, age and socio-economic status. Error bars represent one standard error of the mean.

## **PARTIE III : DISCUSSION GENERALE**

### **Remarque :**

Chaque article comporte sa propre discussion, que nous n'allons pas reprendre ici. Nous allons donc seulement faire une synthèse de nos travaux et discuter de quelques points complémentaires dans cette partie.

## **Synthèse de nos recherches**

Pendant notre thèse, nous avons cherché à mettre en évidence l'impact de l'apprentissage de la lecture sur le fonctionnement cérébral, notamment sur le système visuel et le réseau du langage parlé. Nos résultats semblent montrer que l'alphanétisation supprime le mécanisme de généralisation en miroir pour les stimuli alphabétiques. Cette perte de la généralisation en miroir semble se transférer à d'autres stimuli visuels semblables aux lettres, comme des fausses polices, et même, dans une moindre mesure, à d'autres catégories tels que les visages, les maisons ou les outils. D'autre part, nous avons montré qu'une région restreinte dans le cortex occipito-temporal gauche qui répond aux stimuli orthographiques (appelé l'aire de la forme visuelle des mots- VWFA pour Visual Word Form Area en anglais) présente, chez les lecteurs, une discrimination automatique entre les images en miroir des lettres isolées. En revanche, cette même région répond de manière invariante pour les images iconiques en miroir. Nous résultats ont montré en outre que cette partie du cortex spécialisée dans l'orthographe s'active de façon proportionnelle au niveau de lecture du sujet. De plus, elle peut-être modulée de façon 'descendante' lorsque la tâche l'exige (décision lexicale), c'est-à-dire, une activation des représentations orthographiques peut avoir lieu lorsqu'elles sont utiles à la tâche. En contrepartie, cette activation du code orthographique n'a pas eu lieu lors de l'écoute passive des phrases. En outre, nous avons observé qu'une région phonologique (*planum temporale*) présente, en réponse aux stimuli parlés, une activation qui est proportionnelle à la performance de lecture du sujet (voir aussi les effets de l'alphanétisation sur les représentations phonologiques chez l'enfant (Alario et al., 2007a)).

Donc, la pratique de la conversion graphème-phonème lors de la lecture semble augmenter les réponses cérébrales aux stimuli parlés. Nous avons constaté également des augmentations des réponses dans le système visuel en rapport avec le niveau de lecture, pas seulement aux stimuli alphabétiques, mais généralisés à tous les autres. Nos mesures ont été assez sensibles pour mettre en évidence que même les régions responsables du traitement visuel de plus bas

niveau comme le cortex visuel primaire est sujet à cette influence de la lecture, et cela était d'autant plus important pour les stimuli (damiers) présentant une configuration horizontale et pas verticale, ce qui correspond à la distribution spatiale des textes dans notre système d'écriture occidental [voir aussi (Nazir et al., 2004; Rosazza et al., 2009; Cai et al., 2010)]. Pratiquement tous les résultats obtenus ont pu être également observés lorsque les sujets alphabétisés tardivement, à l'âge adulte, ont été comparés aux illettrés, témoignant ainsi d'une importante plasticité des systèmes neuronaux qui soutiennent la lecture.

### ***Biais possibles lors des tests comportementaux chez les illettrés***

Les tests comportementaux avec les illettrés montrent très souvent un niveau plus bas de réussite par rapport à des sujets lettrés dans les domaines les plus divers. De plus de réels effets du manque d'alphabétisation et de scolarisation, divers sortes de biais peuvent intervenir.

La situation de test, en soi, est fort inhabituelle pour quelqu'un qui n'a pas fréquenté l'école. De façon générale, les illettrés ne sont pas habitués à être testés d'une façon générale, encore moins si cela devient théorique (les travaux de Luria et d'autres études plus récents l'ont bien démontré). De plus, les tests peuvent manquer de signification pour eux, c'est-à-dire, ne pas avoir de pertinence dans leurs contextes de vie. Le manque de familiarité avec les instruments scolaires (crayon, ordinateur...) peut également influencer les résultats. Leur lexique et leurs connaissances souvent plus limitées peuvent aussi poser des difficultés à la compréhension de la tâche et de certains éléments de l'expérience. Finalement, un manque de confiance en soi, un certain sentiment d'infériorité et même des moments de « panique » peuvent également modifier dramatiquement leurs performances et nous en avons été témoins. En revanche, nous avons constaté également une amélioration possible du taux de réussite aux tests après une brève période, pendant laquelle ils reprennent de l'assurance. Dans ce cadre de recherche, il est donc encore plus fondamental de s'assurer de la bonne compréhension et du confort des participants afin qu'ils puissent montrer leurs véritables capacités.

## **Apprentissage de la lecture tout au long de la vie**

Les études développementales sur l'impact de l'alphabétisation comparent l'enfant avant et après l'apprentissage de la lecture (Alario et al., 2007a). Elles essaient parfois de contourner le problème de la maturation cérébrale en testant les compétences comportementales ou l'activité cérébrale de différents enfants *du même âge*, en mettant en comparant ceux qui savent lire avec ceux qui ne le savent pas encore. Une autre approche permettant de contourner le facteur confondant de la maturation a été utilisée dans nos études. Il s'agissait d'étudier l'activité cérébrale d'adultes lettrés et de la comparer à celle d'adultes illettrés. L'inclusion d'un troisième groupe de participants, alphabétisés à l'âge adulte (ex-illettrés), nous a permis de séparer les facteurs de scolarisation, d'alphabétisation et d'âge d'acquisition de la lecture. En effet, la confrontation des résultats de ces divers groupes nous a amené à une série de modèles, reflétant les effets suivants (Dehaene et al., 2010b) :

- apprentissage tardif de la lecture (ex-illettrés vs illettrés),
- apprentissage précoce de la lecture (lettres vs ex-illettrés),
- scolarisation (lettres vs illettrés),
- performance de lecture atteinte (parmi les scolarisés à l'enfance).

Nos résultats ont montré, chez les ex-illettrés, des réponses cérébrales aux mots écrits et entendus similaires à celles des lettrés dans une grande partie des analyses (Dehaene et al., 2010b) et des patterns de réponses comportementales vis-à-vis de la perte de l'invariance en miroir, également comparables entre les groupes (Pegado et al., *article soumis*).

Ces résultats sont d'autant plus surprenants, compte tenu des différences importantes observées au niveau neurobiologique, entre l'apprentissage dès l'enfance et à l'âge adulte (Singer, 2008). Il est évident que toute la cascade d'événements secondaires consécutifs à l'apprentissage précoce ne se produira pas dans le cas d'une alphabétisation tardive. Malgré cela, nos résultats suggèrent que le système nerveux dispose d'une plasticité suffisante pour soutenir l'apprentissage tardif de la lecture. Ils soutiennent donc l'idée d'une *absence de période critique* pour l'apprentissage de la lecture, qui est une activité purement culturelle.

## **L'apprentissage de la lecture et la scolarisation entraînent-ils des pertes de fonction?**

Il est évident que ne pas avoir accès à la lecture constitue un grand handicap social. Il est donc difficile d'imaginer qu'une personne privée d'éducation puisse gagner quelque chose en contrepartie. Mais apprendre pourrait avoir un coût. Le fait de spécialiser certains réseaux neuronaux pour des fonctions liées à la lecture pourrait éventuellement éviter le développement d'autres capacités ou même induire un certain désapprentissage de certains mécanismes spontanés. La perte de la "généralisation en miroir" en est un exemple. La spécialisation de la VWFA pour l'orthographe aux dépens du traitement des visages ou des objets pourraient en constituer un autre. Les illettrés seraient-ils pour autant plus performants que les lettrés pour la reconnaissance des visages par exemple ? Ou est-ce que d'autres compétences acquises avec la lecture et la scolarisation compenseraient cette « perte de la masse neuronale » dédié au traitement des visages dans la VWFA chez les lettrés ? Paulo Ventura et ses collaborateurs essaient actuellement de répondre à ces questions avec une étude comportementale sur le traitement des visages chez les illettrés et les lettrés. Les données sont encore en cours d'analyse, mais les premiers résultats suggèrent que les illettrés ne seraient pas plus performants pour le traitement des visages, mais simplement qu'ils adopteraient un style d'analyse plus holistique alors que les lettrés auraient un style plus analytique.

En outre, les conditions de vie spécifiques à la plupart des illettrés pourraient favoriser le développement de certaines expertises. Lantz a montré que les enfants illettrés étaient meilleurs que les lettrés dans les tâches de séparation de graines par exemple (Lantz, 1979). Cela est un exemple d'expertise visio-motrice spécifique, mais serait-il possible de trouver des compétences plus générales pour lesquelles les illettrés seraient meilleurs ?

De façon anecdotique, une des nos participantes nous avait informé s'être mariée à l'âge de onze ans et avoir eu son premier enfant à douze ans ! Un autre avait fui la maison à l'âge de neuf ans, à cause de son père violent pour « gagner sa vie ». Il est plausible que la confrontation très précoce au monde du travail ou parfois même à 'l'univers de la rue' puisse les rendre moins naïfs et leur donner un sens plus aigu des relations sociales que les autres enfants et adolescents du même âge. Au Brésil par exemple, les enfants et adolescents non scolarisés deviennent souvent vendeurs de rue. Pour cela, ils doivent apprendre les rudiments des nombres. Mais pour vendre, ils développent surtout un bon niveau d'inférence des

intentions d'autrui, des capacités d'argumentation, une aptitude aux prises de décisions rapides (parfois littéralement vitales dans ce contexte), etc. Peut-être faut-il donc chercher des compétences supérieures des jeunes illettrés dans le domaine de la cognition sociale par exemple ?

## ***Seules les dimensions pertinentes pour la lecture semblent être implémentées au niveau neuronal***

Pendant la lecture, on maximise les petites différences pertinentes (par exemple entre ‘e’ et ‘c’) et on ignore les grandes différences non-pertinentes (entre ‘A’ et ‘a’) afin que les conversions phonologiques et sémantiques puissent se faire de façon fluide.

En fait, les discriminations de la taille des lettres, casse (majuscule/minuscule), position absolue ou espacement des lettres (jusqu'à certaines limites), sont toutes des dimensions sans pertinence pour la lecture. C'est même l'inverse qui est plus utile pour lire, c'est-à-dire, pour avoir une représentation invariante de ces dimensions, et nous permettre par exemple de considérer un ‘A’ comme l'équivalent d'un ‘a’ (invariance pour la casse) ou de lire ‘d i s t a n c e’ de la même façon que ‘distance’ (invariance pour l'espacement des lettres). En effet, les recherches ont montré des réponses invariantes pour ces dimensions dans la région de la forme visuelle des mots (VWFA) et cela même lorsque les stimuli sont présentés de façon subliminale (Dehaene et al., 2001, 2005).

Nos recherches en revanche ont mis en évidence un exemple contraire. Lorsqu'une discrimination spécifique est pertinente pour la lecture, elle s'impose au comportement du sujet (Pegado et al. 2011, *article soumis*) et aux processus neuronaux sous-jacents (Pegado et al., 2011) en brisant automatiquement et inéluctablement l'invariance en miroir. Cela est encore plus remarquable compte tenu de l'ancienneté du mécanisme d'invariance en miroir chez l'homme, tant du point de vue ontogénétique que phylogénétique. D'autant plus que l'apprentissage tardif (avec un entraînement quotidien modeste) a été suffisant pour briser cette symétrie au sein du système visuel.

## ***Les mécanismes d'invariance en miroir et l'organisation hiérarchique de la voie ventrale***

Deux mécanismes qui ne sont pas forcément mutuellement exclusifs pourraient expliquer l'invariance en miroir. Un premier suppose la duplication de l'image perçue par un hémisphère avec un transfert de l'information à travers le corps calleux vers l'autre hémisphère. Compte tenu des connections homotopiques, l'image s'inverserait (un « b » deviendrait un « d »). Les mises en évidence d'un transfert inter-hémisphérique chez le pigeon (Mello, 1965, 1967; Beale et al., 1972) et le singe (Noble, 1966) appuient l'hypothèse de l'existence d'un tel mécanisme.

Un deuxième mécanisme suppose qu'à un certain niveau de la hiérarchie du cortex visuel, qui rassemble progressivement les traits des images, l'organisation gauche-droite cesse simplement d'être codée. Cette hypothèse est étayée par des enregistrements cérébraux directs dans le cortex inféro-temporal (IT) du singe macaque, dont les neurones répondent à la fois à leur stimulus préféré mais également à sa version en miroir (Logothetis et al., 1995; Rollenhagen, J.E. et Olson, C.R., 2000; Freiwald et Tsao, 2010).

En effet, Winrich Freiwald et Doris Tsao ont pu mettre en évidence un gradient postérieur-antérieur avec des niveaux croissants d'invariance à travers le cortex IT en réponse à des stimuli de visages (Freiwald et Tsao, 2010). Les neurones plus postérieurs se sont montrés sensibles à une orientation donnée des visages, sans discriminer leur identité. Une région intermédiaire (AL) répondait de la même façon pour des images inversées du même visage (invariant en miroir), tout en étant sensible à leur identité. Finalement, les neurones d'une région plus antérieure (AM) répondent à nouveau pour les inversions en miroir mais également pour toutes les autres orientations de son visage préféré, suggérant une représentation neuronale plus abstraite à ce niveau de la hiérarchie.

Dans le domaine de la lecture nous avons mis en évidence au cours de cette thèse qu'une région restreinte du cortex occipito-temporal gauche, qui répond à des stimuli orthographiques (la VWFA) présentait un patron invariant à l'orientation gauche-droite des images, tout en discriminant celle des lettres isolées (Pegado et al., 2011). Cela a été aussi le cas pour les mots entiers, dans un autre travail au sein du laboratoire (Dehaene et al., 2010a). Il semble par conséquent raisonnable de spéculer que la VWFA a pu jouer un rôle considérable dans les processus décisionnels pendant notre tâche comportementale

égal/différent où les stimuli alphabétiques en miroir devaient être assignés comme égaux, ralentissant les réponses et contribuant à augmenter les erreurs (Pegado et al., *submitted*). D'ailleurs, le niveau d'interférence a été proportionnel à la fluence de lecture et les illettrés ont montré un patron de réponses invariant pour l'orientation gauche-droite pour tous les stimuli visuels.

Une similarité entre l'organisation hiérarchique de la voie ventrale pour le traitement des *visages* et des *mots* pourrait exister. Cela a été proposé par le modèle de détection de combinaisons locales (Dehaene et al., 2005) et soutenu par des données expérimentales (Dehaene et al., 2004; Vinckier et al., 2007). La VWFA qui répond de façon invariante pour les images en miroir et qui avant l'acquisition de la lecture semble répondre aux visages (Dehaene et al., 2010b; Cantlon et al., 2011) pourrait être l'homologue de la région AL chez le singe. En revanche, après l'acquisition de la lecture, une différence fondamentale émerge entre le traitement des visages et des mots : l'invariance en miroir disparaît pour ces derniers. Il convient néanmoins d'interpréter ces résultats avec un peu de prudence: il se peut que les mesures en IRMf aient manqué de sensibilité à la détection d'effets subtils témoignant d'un certain transfert de cette capacité de discrimination des orientations vers des catégories visuelles extérieures au domaine de la lecture, comme ont pu le suggérer nos données comportementales.

## ***Le champ émergent de la Neuro-éducation***

Le choix de méthodes d'enseignement ne devrait pas se baser uniquement sur l'intuition des enseignants ou des ministres, tout comme le choix des méthodes thérapeutiques ne reposent pas uniquement sur l'intuition du clinicien, mais également sur des évidences scientifiques.

La recherche fondamentale sur la lecture, avec notamment l'utilisation des techniques actuelles de neuro-imagerie, peut fournir des éléments fondateurs pour la compréhension des mécanismes neuronaux qui soutiennent la lecture. Ces connaissances peuvent *in fine* ouvrir de nouvelles voies pour l'optimisation des méthodes d'enseignement, toute comme pour l'optimisation de la prise en charge des enfants dyslexiques ou d'adultes cérébro-lésés alexiques.

En effet une nouvelle discipline est en train d'émerger dans l'interface entre neurosciences et éducation : la neuro-education. Nos recherches et d'autres (Paulesu et al.,

2000; Brem et al., 2010) en constituent des exemples dans le domaine de la lecture et de la cognition mathématique (Wilson et al., 2006). De plus, la neuro-imagerie peut aider également à la compréhension de l'activité cérébrale pathologique dans le domaine des apprentissages, comme pour la dyslexie (Paulesu et al., 1996, 2001; Ramus, 2004; Silani et al., 2005; Ziegler et al., 2008). En effet, la confrontation de la recherche fondamentale sur les personnes non-alphabétisées avec les données des patients dyslexiques peut également se révéler utile pour faire la part entre les difficultés de lecture en général et les difficultés spécifiques à la dyslexie. Par exemple, le groupe de José Morais a montré que seuls les illettrés (contrairement aux dyslexiques) étaient capables de *catégoriser* les phonèmes (Serniclaes et al., 2005). Donc, cette difficulté catégorielle chez les dyslexiques ne serait pas une *conséquence* de la dyslexie (difficulté à lire), mais plutôt liée à la pathologie proprement dite. En revanche, la moindre activation dans la région phonologique du *planum temporale* évoquée par les stimuli parlés est observée à la fois chez les dyslexiques (Blau et al., 2010) et les illettrés (Dehaene et al., 2010b). Cette hypoactivation au niveau du *planum temporale* serait donc probablement liée aux difficultés de lecture en général (un moindre développement des représentations phonologiques ?) et pas à la dyslexie *per se*.

En outre, certains auteurs évoquent même le bénéfice potentiel de l'identification de bio-marqueurs de l'apprentissage grâce à la neuro-imagerie (Goswami, 2009). Ils arguent que le développement des marqueurs cérébraux robustes témoignant de l'apprentissage effectif pourraient servir à différentes finalités : repérage des enfants à risque pour permettre une intervention précoce avant l'échec scolaire, ciblage de la rééducation en fonction de ces marqueurs, ou encore l'utilisation des marqueurs comme repères dans l'accompagnement des interventions thérapeutiques.

Enfin, les méthodes de Neuro-feedback, à travers l'utilisation de l'information directe et immédiate de l'activité cérébrale par le sujet, peuvent avoir un avenir dans la prise en charge de certains patients (Brandeis, 2011).

## **PARTIE IV : CONCLUSION**

La littérature scientifique nous montre qu'il est possible de distinguer les compétences cognitives spontanément acquises sans éducation formelle - comme les notions géométriques et le calcul approximatif - de celles qui nécessitent une scolarisation - comme le calcul exact, la représentation interne linéaire de l'espace et la lecture).

Les recherches suggèrent encore que les sujets n'ayant pu bénéficier d'un enseignement scolaire présentent une tendance spontanée à répondre aux questions théoriques de façon « concrète », c'est-à-dire en s'appuyant uniquement sur leurs connaissances de la réalité quotidienne et non sur un raisonnement hypothétique ou théorique. En revanche, le passage à un mode cognitif plus abstrait, basé sur des hypothèses et dégagé ainsi de la réalité immédiate ou quotidienne, est clairement possible chez les illettrés à condition que cela soit explicitement provoqué.

En outre, l'apprentissage de la correspondance graphème-phonème (lecture), permet l'émergence de la capacité à manipuler mentalement les sons du langage au niveau le plus subtil, c'est-à-dire celui du phonème (conscience phonémique). De plus, la relation entre compétences phonologiques et niveau de lecture reste vraie également dans le sens inverse: le niveau de base des compétences phonologiques des enfants préscolaires prédit la facilité à apprendre la lecture, même dans les systèmes non-alphabétiques (Mandarin Chinois par exemple).

Nos travaux ont montré différents changements neuronaux consécutifs à l'apprentissage de la lecture. D'une part, l'alphanétisation induit un clivage de la symétrie en miroir des stimuli alphabétiques (pour nous permettre de distinguer 'b' et 'd' par exemple), et cette discrimination de l'orientation semble être implantée dans une partie de la voie ventrale responsable du traitement orthographique : le cortex occipito-temporal gauche (région connue comme l'aire de la forme visuelle des mots ou Visual Word Form Area [VWFA] en anglais). Nos données suggèrent encore que, chez les lecteurs, il existe un certain transfert de cette capacité de discrimination de l'orientation gauche-droite à d'autres catégories de stimuli visuel (pour les fausses polices notamment et même, à un moindre degré, pour les visages, les maisons et les objets). Nos résultats ont également mis en évidence, d'une part, une augmentation des activations cérébrales en rapport avec le niveau de lecture dans la VWFA pour les caractères alphabétiques et, d'autre part, une augmentation généralisée des activations dans les cortex fusiformes et occipitaux (y compris V1) pour tous les types de stimuli visuels. Nous avons aussi constaté une augmentation des réponses

cérébrales en proportion au niveau de lecture des sujets dans la région phonologique du *planum temporale*, en réponse aux stimuli parlés. De plus, lors de la tâche de décision lexicale *auditive*, où les vrais mots devaient être discriminés des pseudo-mots, les lecteurs activaient des représentations orthographiques dans la VWFA de façon ‘descendante’, ce qui n’a pas été le cas lors de l’écoute passive des phrases. La plupart de ces modifications cérébrales ont été observées également chez les sujets alphabétisés tardivement mais pas chez les illettrés. Et cela s’observe y compris pour des mécanismes neuronaux bien établis au cours de l’évolution, comme l’invariance en miroir, ce qui laisse à penser que les réseaux neuronaux qui soutiennent la lecture font preuve d’une grande plasticité. Nos travaux montrent qu’apprendre à lire modifie profondément les circuits cérébraux de la vision et du langage. Nos résultats s’opposent également à la notion de période critique pour l’alphabétisation.

## Références Bibliographiques

- Abutalebi J, Keim R, Brambati SM, Tettamanti M, Cappa SF, De Bleser R, Perani D (2007) Late acquisition of literacy in a native language. *Hum Brain Mapp* 28:19-33 Available at: <http://doi.wiley.com/10.1002/hbm.20240>.
- Alario F-X, De Cara B, Ziegler JC (2007a) Automatic activation of phonology in silent reading is parallel: evidence from beginning and skilled readers. *J Exp Child Psychol* 97:205-219 Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17399735>.
- Alario F-X, Perre L, Castel C, Ziegler JC (2007b) The role of orthography in speech production revisited. *Cognition* 102:464-475
- Beale IL, Williams RJ, Webster DM, Corballis MC (1972) Confusion of Mirror Images by Pigeons and Interhemispheric Commissures. *Nature* 238:348-349 Available at: <http://dx.doi.org.gate2.inist.fr/10.1038/238348a0> [Consulté avril 1, 2010].
- Biederman I, Cooper EE (1991) Evidence for complete translational and reflectional invariance in visual object priming. *Perception* 20:585-593 Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov.gate2.inist.fr/pubmed/1806902> [Consulté mars 31, 2010].
- Biederman I, Cooper EE (2009) Translational and reflectional priming invariance: a retrospective. *Perception* 38:809-817
- Blau V, Reithler J, van Atteveldt N, Seitz J, Gerretsen P, Goebel R, Blomert L (2010) Deviant processing of letters and speech sounds as proximate cause of reading failure: a functional magnetic resonance imaging study of dyslexic children. *Brain*.
- Bolger DJ, Perfetti CA, Schneider W (2005) Cross-cultural effect on the brain revisited: universal structures plus writing system variation. *Hum Brain Mapp* 25:92-104 Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15846818> [Consulté juin 25, 2011].
- Bornstein MH, Gross CG, Wolf JZ (1978) Perceptual similarity of mirror images in infancy. *Cognition* 6:89-116 Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/679649> [Consulté janvier 26, 2010].
- Bornstein MH, Krinsky SJ, Benasich AA (1986) Fine orientation discrimination and shape constancy in young infants. *J Exp Child Psychol* 41:49-60 Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3950539> [Consulté mars 30, 2011].
- Brandeis D (2011) Neurofeedback training in ADHD: more news on specificity. *Clin Neurophysiol* 122:856-857
- Brem S, Bach S, Kucian K, Guttorm TK, Martin E, Lyytinen H, Brandeis D, Richardson U (2010) From the Cover: Brain sensitivity to print emerges when children learn letter-speech sound correspondences. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107:7939-7944 Available at: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0904402107>.

- Burgess SR, Lonigan CJ (1998) Bidirectional relations of phonological sensitivity and prereading abilities: evidence from a preschool sample. *J Exp Child Psychol* 70:117-141 Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9729452> [Consulté septembre 27, 2011].
- Bürki A, Alario F-X, Frauenfelder UH (in press) Lexical representation of phonological variants: evidence from pseudohomophone effects. *Journal of Memory and Language*.
- Cai Q, Lavidor M, Brysbaert M, Paulignan Y, Nazir TA (2008) Cerebral lateralization of frontal lobe language processes and lateralization of the posterior visual word processing system. *J Cogn Neurosci* 20:672-681
- Cai Q, Paulignan Y, Brysbaert M, Ibarrola D, Nazir TA (2010) The left ventral occipito-temporal response to words depends on language lateralization but not on visual familiarity. *Cereb Cortex* 20:1153-1163
- Cantlon JF, Pinel P, Dehaene S, Pelpfrey KA (2011) Cortical representations of symbols, objects, and faces are pruned back during early childhood. *Cereb Cortex* 21:191-199 Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20457691> [Consulté mai 12, 2011].
- Carreiras M, Seghier ML, Baquero S, Estévez A, Lozano A, Devlin JT, Price CJ (2009) An anatomical signature for literacy. *Nature* 461:983-986 Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19829380> [Consulté novembre 19, 2009].
- Castro-Caldas A, Miranda PC, Carmo I, Reis A, Leote F, Ribeiro C, Ducla-Soares E (1999) Influence of learning to read and write on the morphology of the corpus callosum. *Eur J Neurol* 6:23-28 Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10209345> [Consulté janvier 10, 2010].
- Castro-Caldas A, Petersson KM, Reis A, Stone-Elander S, Ingvar M (1998) The illiterate brain. Learning to read and write during childhood influences the functional organization of the adult brain. *Brain* 121:1053.
- Cohen L (2003) Visual Word Recognition in the Left and Right Hemispheres: Anatomical and Functional Correlates of Peripheral Alexias. *Cerebral Cortex* 13:1313-1333 Available at: <http://www.cercor.oupjournals.org/cgi/doi/10.1093/cercor/bhg079>.
- Cohen L, Dehaene S, Naccache L, Lehéricy S, Dehaene-Lambertz G, Hénaff MA, Michel F (2000) The visual word form area: spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. *Brain* 123 ( Pt 2):291-307
- Cohen L, Lehéricy S, Chochon F, Lemer C, Rivaud S, Dehaene S (2002) Language-specific tuning of visual cortex? Functional properties of the Visual Word Form Area. *Brain* 125:1054-1069
- Cornell (1985) Spontaneous mirror-writing in children. *Can J Exp Psychol* 39:174–179.
- Damasio AR, Castro-Caldas A, Grosso JT, Ferro JM (1976) Brain specialization for language does not depend on literacy. *Arch Neurol* 33:300-301 Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1259645> [Consulté juillet 7, 2011].

Danziger E, Pederson E (1998) Through the looking glass : Literacy, writing systems and mirror-image discrimination. *Written language and literacy* 1:153-169.

Dehaene S (2007) Les neurones de la lecture. Odile Jacob.

Dehaene S, Cohen L (2007) Cultural Recycling of Cortical Maps. *Neuron* 56:384-398  
Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0896627307007593>.

Dehaene S, Cohen L, Sigman M, Vinckier F (2005) The neural code for written words: a proposal. *Trends in Cognitive Sciences* 9:335-341

Dehaene S, Izard V, Pica P, Spelke E (2006) Core knowledge of geometry in an Amazonian indigene group. *Science* 311:381-384

Dehaene S, Izard V, Spelke E, Pica P (2008) Log or Linear? Distinct Intuitions of the Number Scale in Western and Amazonian Indigene Cultures. *Science* 320:1217-1220  
Available at: <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1156540>.

Dehaene S, Jobert A, Naccache L, Ciuciu P, Poline JB, Le Bihan D, Cohen L (2004) Letter Binding and Invariant Recognition of Masked Words. Behavioral and Neuroimaging Evidence. *Psychological Science* 15:307–313.

Dehaene S, Naccache L, Cohen L, Bihan DL, Mangin JF, Poline JB, Rivière D (2001) Cerebral mechanisms of word masking and unconscious repetition priming. *Nature Neuroscience* 4:752–758.

Dehaene S, Nakamura K, Jobert A, Kuroki C, Ogawa S, Cohen L (2010a) Why do children make mirror errors in reading? Neural correlates of mirror invariance in the visual word form area. *NeuroImage* 49:1837-1848

Dehaene S, Pegado F, Braga LW, Ventura P, Nunes Filho G, Jobert A, Dehaene-Lambertz G, Kolinsky R, Morais J, Cohen L (2010b) How learning to read changes the cortical networks for vision and language. *Science* 330:1359-1364

Dias M, Roazzi A, Harris PL (2005) Reasoning From Unfamiliar Premises. *Psychological Science* 16:550.

Dilks DD, Julian JB, Kubilius J, Spelke ES, Kanwisher N (2011) Mirror-Image Sensitivity and Invariance in Object and Scene Processing Pathways. *The Journal of Neuroscience* 31:11305 -11312

Draganski B, Gaser C, Busch V, Schuierer G, Bogdahn U, May A (2004) Neuroplasticity: changes in grey matter induced by training. *Nature* 427:311-312 Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14737157> [Consulté septembre 21, 2011].

Eger E (2004) BOLD Repetition Decreases in Object-Responsive Ventral Visual Areas Depend on Spatial Attention. *Journal of Neurophysiology* 92:1241-1247 Available at: <http://jn.physiology.org/cgi/doi/10.1152/jn.00206.2004>.

Freiwald WA, Tsao DY (2010) Functional Compartmentalization and Viewpoint Generalization Within the Macaque Face-Processing System. *Science* 330:845-851 Available at: <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1194908>.

- Goswami U (2009) Mind, Brain, and Literacy: Biomarkers as Usable Knowledge for Education. *Mind, Brain, and Education* 3:176–184.
- Gregory E, McCloskey M (2010) Mirror-image confusions: Implications for representation and processing of object orientation. *Cognition* 116:110-129
- Hasson U, Harel M, Levy I, Malach R (2003) Large-scale mirror-symmetry organization of human occipito-temporal object areas. *Neuron* 37:1027–1041.
- Ishai A, Ungerleider LG, Martin A, Haxby JV (2000) The representation of objects in the human occipital and temporal cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience* 12:35–51.
- Lantz D (1979) A cross-cultural comparison of communication abilities: Some effects of age, schooling, and culture. *International Journal of Psychology* 14:171–183.
- Lecours AR, Mehler J, Parente MA, Aguiar LR, da Silva AB, Caetano M, Camarotti H, Castro MJ, Dehaut F, Dumais C (1987a) Illiteracy and brain damage. 2. Manifestations of unilateral neglect in testing « auditory comprehension » with iconographic materials. *Brain Cogn* 6:243-265
- Lecours AR, Mehler J, Parente MA, Beltrami MC, de Tolipan LC, Cary L, Castro MJ, Carrono V, Chagastelles L, Dehaut F, others (1988) Illiteracy and brain damage 3: A contribution to the study of speech and language disorders in illiterates with unilateral brain damage (initial testing). *Neuropsychologia* 26:575–589.
- Lecours AR, Mehler J, Parente MA, Caldeira A, Cary L, Castro MJ, Dehaut F, Delgado R, Gurd J, de Fraga Karmann D, others (1987b) Illiteracy and brain damage–1. Aphasia testing in culturally contrasted populations (control subjects). *Neuropsychologia* 25:231–245.
- Li G, Cheung RTF, Gao JH, Lee TMC, Tan LH, Fox PT, Jack CR, Yang ES (2006) Cognitive processing in Chinese literate and illiterate subjects: An fMRI study. *Hum Brain Mapp* 27:144-152 Available at: <http://doi.wiley.com/10.1002/hbm.20173>.
- Lin D, McBride-Chang C, Shu H, Zhang Y, Li H, Zhang J, Aram D, Levin I (2010) Small wins big: analytic pinyin skills promote Chinese word reading. *Psychol Sci* 21:1117-1122 Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20581343>
- Logothetis NK, Pauls J (1995) Psychophysical and physiological evidence for viewer-centered object representations in the primate. *Cereb Cortex* 5:270-288 Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov.gate2.inist.fr/pubmed/7613082> [Consulté février 25, 2010].
- Logothetis NK, Pauls J, Poggio T (1995) Shape representation in the inferior temporal cortex of monkeys. *Curr Biol* 5:552-563
- Lonigan CJ, Burgess SR, Anthony JL (2000) Development of emergent literacy and early reading skills in preschool children: evidence from a latent-variable longitudinal study. *Dev Psychol* 36:596-613

- Loureiro CS, Willadino Braga L, Souza LN, Filho GN, Queiroz E, Dellatolas G (2004) Degree of illiteracy and phonological and metaphonological skills in unschooled adults. *Brain and Language* 89:499–502.
- Luria AR (1976) Cognitive development, its cultural and social foundations. Harvard Univ Pr.
- van der Mark S, Bucher K, Maurer U, Schulz E, Brem S, Buckelmüller J, Kronbichler M, Loenneker T, Klaver P, Martin E, Brandeis D (2009) Children with dyslexia lack multiple specializations along the visual word-form (VWF) system. *Neuroimage* 47:1940-1949
- Maurer U, Zevin JD, McCandliss BD (2008) Left-lateralized N170 effects of visual expertise in reading: evidence from Japanese syllabic and logographic scripts. *J Cogn Neurosci* 20:1878-1891 Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18370600> [Consulté décembre 28, 2009].
- McGurk H (1970) The role of object orientation in infant perception. *J Exp Child Psychol* 9:363-373
- Mello NK (1965) Interhemispheric Reversal of Mirror-Image Oblique Lines after Monocular Training in Pigeons. *Science* 148:252-254
- Mello NK (1967) Inter-hemispheric Comparison of Visual Stimuli in the Pigeon. *Nature* 214:144-145
- Morais J, Bertelson P, Cary L, Alegria J (1987a) Literacy training and speech segmentation. The onset of literacy: Cognitive processes in reading acquisition:45–64.
- Morais J, Cary L, Alegria PB, Bertelson J (1979) Does awareness of speech as a sequence of phones arise spontaneously? *Cognition* 7:323–331.
- Morais J, Castro SL, Scliar-Cabral L, Kolinsky R, Content A (1987b) The effects of literacy on the recognition of dichotic words. *Q J Exp Psychol A* 39:451-465 Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3671762> [Consulté décembre 15, 2009].
- Nakamura K, Dehaene S, Jobert A, Le Bihan D, Kouider S (2005) Subliminal convergence of Kanji and Kana words: further evidence for functional parcellation of the posterior temporal cortex in visual word perception. *J Cogn Neurosci* 17:954-968 Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov.gate2.inist.fr/pubmed/15969912> [Consulté mars 31, 2010].
- Nazir TA, Ben-Boutayab N, Decoppet N, Deutsch A, Frost R (2004) Reading habits, perceptual learning, and recognition of printed words. *Brain Lang* 88:294-311 Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14967213>
- Newman EH, Tardif T, Huang J, Shu H (2011) Phonemes matter: the role of phoneme-level awareness in emergent Chinese readers. *J Exp Child Psychol* 108:242-259 Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20980019>
- Noble J (1966) Mirror-images and the forebrain commissures of the monkey. *Nature* 211:1263-1266 Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/4961422> [Consulté janvier 8, 2010].

Paulesu E, Démonet J-F, Fazio F, McCrory E, Chanoine V, Brunswick N, Cappa SF, Cossu G, Habib M, Frith CD, Frith U (2001) Dyslexia: Cultural Diversity and Biological Unity. *Science* 291:2165 -2167

Paulesu E, Frith U, Snowling M, Gallagher A, Morton J, Frackowiak RS, Frith CD (1996) Is developmental dyslexia a disconnection syndrome? Evidence from PET scanning. *Brain* 119 ( Pt 1):143-157

Paulesu E, McCrory E, Fazio F, Menoncello L, Brunswick N, Cappa SF, Cotelli M, Cossu G, Corte F, Lorusso M, others (2000) A cultural effect on brain function. *Nature Neuroscience* 3:91-96.

Pederson E (2003) Mirror-image discrimination among nonliterate, monoliterate, and biliterate Tamil subjects. *Written language and literacy* 6:71-91.

Peeva MG, Guenther FH, Tourville JA, Nieto-Castanon A, Anton J-L, Nazarian B, Alario F-X (2010) Distinct representations of phonemes, syllables, and supra-syllabic sequences in the speech production network. *Neuroimage* 50:626-638 Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20035884>

Pegado F, Nakamura K, Cohen L, Dehaene S (2011) Breaking the symmetry: Mirror discrimination for single letters but not for pictures in the Visual Word Form Area. *Neuroimage* 55:742-749

Petersson KM, Reis A, Castro-Caldas A, Ingvar M (1999) Effective Auditory–Verbal Encoding Activates the Left Prefrontal and the Medial Temporal Lobes: A Generalization to Illiterate Subjects. *NeuroImage* 10:45–54.

Petersson KM, Silva C, Castro-Caldas A, Ingvar M, Reis A (2007) Literacy: a cultural influence on functional left-right differences in the inferior parietal cortex. *European Journal of Neuroscience* 26:791.

Pica P, Lemer C, Izard V, Dehaene S (2004) Exact and approximate arithmetic in an Amazonian indigene group. *Science* 306:499-503 Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15486303> [Consulté septembre 24, 2011].

Ramus F (2004) Neurobiology of dyslexia: a reinterpretation of the data. *Trends in Neurosciences* 27:720-726

Reverberi C, Cherubini P, Frackowiak RSJ, Caltagirone C, Paulesu E, Macaluso E (2010) Conditional and syllogistic deductive tasks dissociate functionally during premise integration. *Hum Brain Mapp* 31:1430-1445

Reverberi C, Cherubini P, Rapisarda A, Rigamonti E, Caltagirone C, Frackowiak RSJ, Macaluso E, Paulesu E (2007) Neural basis of generation of conclusions in elementary deduction. *Neuroimage* 38:752-762

Rollenhagen, J.E., Olson, C.R. (2000) Mirror-Image Confusion in Single Neurons of the Macaque Inferotemporal Cortex. *Science* 287:1506-1508 Available at: <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.287.5457.1506>.

Rosazza C, Cai Q, Minati L, Paulignan Y, Nazir TA (2009) Early involvement of dorsal and ventral pathways in visual word recognition: an ERP study. *Brain Res* 1272:32-44 Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19332032>

Royer JM, Abadzi H, Kinda J (2004) The Impact of Phonological-Awareness and Rapid-Reading Training on the Reading Skills of Adolescent and Adult Neoliterates. *International Review of Education* 50:53-71.

Serniclaes W, Ventura P, Morais J, Kolinsky R (2005) Categorical perception of speech sounds in illiterate adults. *Cognition* 98:B35-44.

Shu H, Peng H, McBride-Chang C (2008) Phonological awareness in young Chinese children. *Dev Sci* 11:171-181 Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18171377>

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

Simmons DC, Kame'enui EJ, Harn B, Coyne MD, Stoolmiller M, Santoro LE, Smith SB, Beck CT, Kaufman NK (2007) Attributes of effective and efficient kindergarten reading intervention: an examination of instructional time and design specificity. *J Learn Disabil* 40:331-347

Singer W (2008) Epigenesis and brain plasticity in education. *The educated brain: Essays in neuroeducation*:97–109.

Slater A, Morison V, Somers M (1988) Orientation discrimination and cortical function in the human newborn. *Perception* 17:597-602

Stankiewicz BJ, Hummel J, Cooper E (1998) The role of attention in priming for left-right reflections of object images: Evidence for a dual representation of object shape. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 24:732-744.

Sutherland NS (1960b) Theories of Shape Discrimination in Octopus. *Nature* 186:840-4.

Sutherland NS (1960a) Visual discrimination of orientation by octopus: mirror images. *Br J Psychol* 51:9-18

Torgesen JK, Wagner RK, Rashotte CA (1994) Longitudinal studies of phonological processing and reading. *J Learn Disabil* 27:276-286; discussion 287-291 Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8006506>

Ventura P, Kolinsky R, Fernandes S, Querido L, Morais J (2007) Lexical restructuring in the absence of literacy. *Cognition* 105:334–361.

Verhaeghe A, Kolinsky R (1992) Discriminação entre figuras orientadas em espelho em função do modo de apresentação em adultos escolarizados e adultos iletrados. *Actas das I Jornadas de Estudo dos Processos Cognitivos da Sociedade Portuguesa de Psicologia*:51-67.

Vinckier F, Dehaene S, Jobert A, Dubus J, Sigman M, Cohen L (2007) Hierarchical Coding of Letter Strings in the Ventral Stream: Dissecting the Inner Organization of the Visual Word-Form System. *Neuron* 55:143-156

Vuilleumier P, Schwartz S, Duhoux S, Dolan RJ, Driver J (2005) Selective attention modulates neural substrates of repetition priming and “Implicit” visual memory: Suppressions and enhancements revealed by fMRI. *Journal of Cognitive Neuroscience* 17:1245–1260.

Warren JM (1969) Discrimination of mirror images by cats. *Journal of Comparative and Physiological Psychology* 69:9-11

Wilson AJ, Revkin SK, Cohen D, Cohen L, Dehaene S (2006) An open trial assessment of « The Number Race », an adaptive computer game for remediation of dyscalculia. *Behav Brain Funct* 2:20

Ziegler JC, Castel C, Pech-Georgel C, George F, Alario F-X, Perry C (2008) Developmental dyslexia and the dual route model of reading: simulating individual differences and subtypes. *Cognition* 107:151-178

## **Remerciements**

Je souhaiterais avant toute chose remercier mon directeur de thèse, le Professeur Stanislas Dehaene pour ses conseils scientifiques hors pair et sa cordialité. Je lui suis infiniment gréé de m'avoir accordé sa confiance en m'intégrant dans un projet original et de grande ampleur.

Je souhaiterais remercier également le Professeur Laurent Cohen pour tout son aide et ses conseils au long de ses années. Son extraordinaire capacité de synthèse, la qualité didactique de ses explications et le contact respectueux m'ont été un appui précieux.

Je remercie encore le Professor Lionel Naccache, avec qui j'ai commencé mes activités de recherche dans ce laboratoire et qui m'a fait découvrir avec fascination les Neurosciences Cognitives et les Potentiels Evoqués.

J'aimerais remercier aussi mon collègue et cher ami Kimihiro Nakamura, avec qui le travail en équipe a toujours été dynamique et efficace, même dans les bruyants cafés parisiens...

Je remercie ma collègue Antoinette Jobert pour son aide précieuse tout au longue de cette entreprise ambitieuse.

J'aimerais remercier encore les membres du jury - Professor Eraldo Paulesu, Dr F.-Xavier Alario, Dr Tatjana Nazir - d'avoir aimablement accepté de participer à ma soutenance de thèse. Ghislaine Dehaene-Lambertz pour son aide et discussions enrichissantes. Nos collaborateurs internationaux, avec qui nous avons eu le plaisir de travailler: en Belgique, José Morais et Régine Kolinsky; au Portugal, Paulo Ventura et au Brésil, Lucia Braga et son équipe (Gilberto, Denis, Enio, Fabricio, Alexandre(s), Alvaro et tant d'autres) qui nous ont accueillit avec beaucoup de gentillesse et de chaleur. Mon collègue de bureau Sébastien Marti, qui j'ai beaucoup dérangé avec mes scripts de R ou de Matlab et qui m'a toujours aidé efficacement. Christophe Pallier, Antonio Moreno et François Leroy pour les mêmes raisons...

Mes amis qui m'ont aidé avec la révision de l'orthographe du français de ce manuscrit, notamment Nicolas Moreau & Fabrice Réhel, mais également Alexis Bouvier, Gaëlle Cesbron et enfin Jean-Rémy King, Benjamin Rohaut et François Moreew. A notre lab manager Giovanna Santoro et notre secrétaire Laurence Labruna pour leur efficacité et contact sympathique. Je remercie les manips radio et les infirmières de Neurospin qui nous ont aidé avec les acquisitions des données.

Mes collègues de Neurospin et de la Salpétrière qui d'une façon ou d'une autre ont enrichit ma formation scientifique pendant la thèse : Tristan Bekinstein, Jean-Rémy King, Simon van Gaal, Aaron Schurger, Moti Salti, Floris de Lange, Evelyn Eger, Phillippe Pinel, Laurianne Vagharchakian, Sébastien Rodrigo, Imen El Karoui, Lucie Charles, Catherine Wacongne, Baptiste Gauthier, Karla Monzalvo, Caroline Huron, Anne-Dominique Devauchelle, Jessica Dubois, Virginie Van Wassenhove, et tant d'autres...

Enfin, je remercie tout spécialement ma femme, Vera Nitsche, qui a pu me supporter pendant toute cette période, avec parfois des moments plus difficiles et des absences... Merci aussi à Mateo, mon fils, d'avoir toléré mes absences imposées...

# The impact of learning to read on neural circuits of vision and language: studies with illiterate adults

## Summary:

Does learning to read have an impact on neural circuits of vision and language ? In this PhD, we studied the influence of reading expertise on the “mirror invariance” of the visual system. The mirror invariance mechanism enables one to detect mirror versions of an image or a silhouette as easily as the original, thus representing a potential advantage for fast recognition in left or right profiles of conspecifics or predators, enhancing survival. Mirror invariance is also found in non-human primates or other animals and is already functional in human infants. However, in order to learn to read, one must break the mirror symmetry for letters to correctly identify their orientations (e.g., “b” is different from “d”). We could provide behavioural evidence that *illiterate adults* present mirror invariant responses for all visual stimuli used (strings, false-fonts, houses, faces and tools). On the other hand, *literate adults* automatically discerned the left-right orientation of letter strings, even though this was task-irrelevant. Moreover, this literate mirror discrimination could also be noted for false-font stimuli, and, to a much lesser extent, even for other categories. This suggests, a partial *transfer* of this acquired skill outside the domain of the familiar visual symbols of letters. Interestingly, subjects taught to read and write during adulthood (ex-illiterates) also exhibited the literate pattern of responses (i.e., automatic mirror discrimination), indicating a high level of brain plasticity, even for a supposedly well established neuronal mechanism such as mirror invariance. Furthermore, we could perform a separate fMRI study that showed that a restricted region on the left occipito-temporal cortex, known to respond to orthographic stimuli (called the Visual Word Form Area [VWFA]), plays a key role in mirror discernment of letters. However this same region conserves a high degree of mirror invariance for *non alphabetic* pictures.

I could also contribute to an fMRI study of literate, illiterate and ex-illiterate adult brain responses to different visual and auditory (verbal) stimuli. We observed increasing cortical responses as a function of reading fluency in : the VWFA for alphabetic visual stimuli presentations; both primary visual cortex and higher level visual areas (fusiform gyrus) to different visual stimuli; *planum temporal*, a phonological region for auditory language perception. We also noticed top-down activation of orthographic representations in the VWFA during an active auditory lexical decision task. Moreover, the majority of these literacy effects were also found in subjects that learned to read and write in adulthood, suggesting again a high plasticity of neural circuits involved in reading. Finally, our results also suggested that cortical regions previously dedicated to process faces or objects could be “recycled” to respond to orthographic stimuli after learning to read.

Thus, our data provides evidence that learning to read deeply modulates the neural circuits of vision and language and it goes against the notion of a critical period for learning to read

**Keywords:** *reading, education, mirror invariance, cognitive neurosciences, neuro-education.*