

**Régine Kolinsky**

Fonds de la Recherche Scientifique-FNRS & Unité de Recherche en Neurosciences Cognitives (UNESCOG) – Centre de Recherche Cognition & Neurosciences (ULB756) – Université Libre de Bruxelles

**Laurent Cohen**

Institut du Cerveau et de la Moelle Épineuse (UMRS 1127) & Faculté de Médecine Sorbonne Université & Département de Neurologie – Hôpital de la Pitié-Salpêtrière – AP-HP

**José Morais**

Unité de Recherche en Neurosciences Cognitives (UNESCOG) – Centre de Recherche Cognition & Neurosciences (ULB756) – Université Libre de Bruxelles

**Stanislas Dehaene**

Collège de France & Unité INSERM-CEA de NeuroImagerie Cognitive, Centre NeuroSpin, Université Paris Sud – Université Paris-Saclay

---

# Les bases neurales de l'apprentissage de la lecture

## 1. INTRODUCTION <sup>1</sup>

L'invention de l'écriture a profondément transformé la culture humaine au cours de l'histoire, notamment parce que l'écrit fournit une mémoire externe durable, favorisant ainsi l'émergence de la pensée et de l'abstraction formelles (v. Ong 1982). L'écrit n'a cependant pas eu qu'un rôle historique : il nous change personnellement. En effet, cette invention est trop récente (environ 5 400 ans) pour avoir influencé l'évolution génétique. L'apprentissage de l'écrit nécessite donc un « recyclage » de régions cérébrales dédiées à d'autres fonctions, mais assez plastiques pour se réorienter vers l'identification des signes écrits et leur mise en relation avec le langage parlé (v. Dehaene & Cohen 2007).

Nous examinerons les preuves objectives de cette transformation profonde de notre cerveau en privilégiant les études qui ont comparé des adultes restés illettrés pour des raisons strictement socio-économiques à des adultes lettrés, y compris ceux qui ne sont devenus lettrés qu'à l'âge adulte, que nous appelons *ex-illettrés*. Contrairement à la plupart des études contrastant des enfants pré-lecteurs d'âge préscolaire à ceux déjà scolarisés et lettrés, cette comparaison permet d'éliminer les effets de la maturation cérébrale et ceux reflétant l'impact des apprentissages formels réalisés à l'école.

---

1. La préparation de cet article a bénéficié de plusieurs soutiens et sources de financement. Certains ont été attribués au premier auteur (R. Kolinsky) par le FRS-FNRS (convention CDR J.0141.16), ainsi que par l'Université Libre de Bruxelles (convention FER). D'autres étaient destinés à L. Cohen et Stanislas Dehaene dans le cadre du programme d'Investissements d'avenir (ANR-10-IAIHU-06 ; Institut du Cerveau et de la Moelle Épineuse). L'équipe de S. Dehaene souhaite également remercier le Collège de France, l'INSERM, le CEA et la Fondation Bettencourt-Schueller.

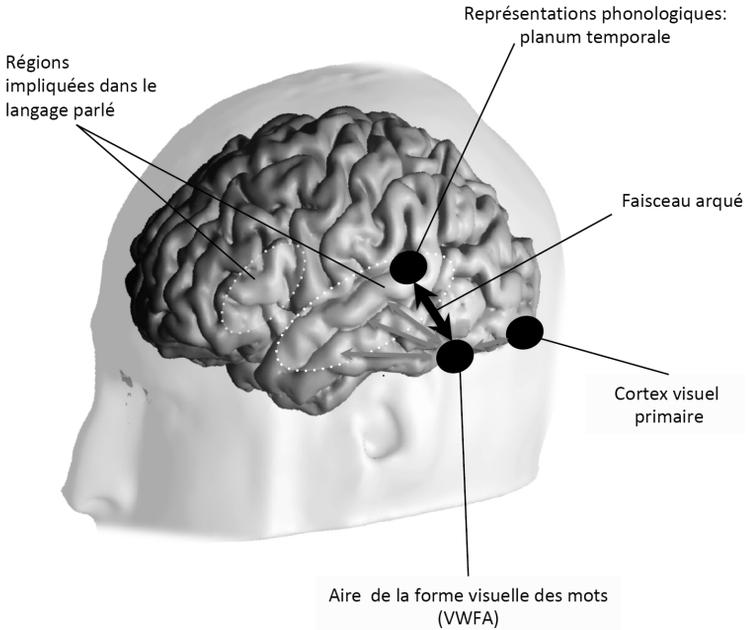
Ces données montrent que l'apprentissage de la lecture constitue un exemple remarquable de plasticité corticale, et donc de recyclage neuronal, et nous discuterons de leurs implications pour les éducateurs d'enfants normo-lecteurs et dyslexiques, ainsi que d'une éventuelle décroissance avec l'âge de cette plasticité. Des considérations éthiques et sociopolitiques liées à ces faits seront aussi envisagées, eu égard aussi au niveau très faible de littératie des adolescents français scolarisés.

## **2. L'APPRENTISSAGE DE LA LECTURE STIMULE ET RÉORGANISE LE SYSTÈME VISUEL**

La reconnaissance visuelle des lettres et suites de lettres est réalisée par un réseau de neurones spécifique connu actuellement sous le nom d'*aire de la forme visuelle des mots*, en anglais *VWFA* (Cohen *et al.* 2000). Le neurologue français J. Déjerine (1892) suggéra qu'une aire cérébrale devait être spécialisée dans le traitement visuel du langage écrit. Il avait observé que l'un de ses patients, atteint d'une lésion dans la partie postérieure du système visuel de l'hémisphère gauche, n'était plus capable de lire malgré une vision et une capacité d'écriture préservées. Récemment, la base cérébrale de ce trouble, dit *alexie sans agraphie*, a été étudiée plus finement grâce à l'imagerie cérébrale (v. Cohen *et al.* 2003) et à l'enregistrement intracrânien des réponses électrophysiologiques du cerveau (Gaillard *et al.* 2006). La région dont la lésion est responsable de l'alexie sans agraphie, et qui donc sous-tend l'habileté de lecture, se trouve dans le gyrus fusiforme du cortex occipito-temporal inférieur (ventral) gauche (Fig. 1). Son activation en réponse à l'écrit avait déjà été observée chez des participants sains grâce à des études électrophysiologiques (v. Nobre, Allison & McCarthy 1994) et d'imagerie cérébrale par tomographie par émission de positons (v. Petersen *et al.* 1988) ou par résonance magnétique fonctionnelle (*IRMf* ; v. Cohen *et al.* 2000).

Cette aire est beaucoup plus mobilisée par les mots écrits que par ceux prononcés oralement (Dehaene *et al.* 2002) et d'autres catégories de stimulus visuels tels que visages ou objets (v. Puce *et al.* 1996). De plus, elle répond davantage aux mots et pseudomots prononçables qu'aux suites de consonnes (v. Cohen *et al.* 2002). Certaines de ses propriétés fonctionnelles sont importantes pour la lecture, comme l'invariance de position spatiale (Cohen *et al.* 2002) et de casse (Dehaene *et al.* 2001) ainsi que le codage de l'ordre des lettres (Dehaene *et al.* 2004). Ces propriétés d'encodage de niveau relativement abstrait émergent progressivement dans la VWFA selon un gradient de sensibilité allant des lettres (partie postérieure) aux mots ou stimuli similaires (partie antérieure), en passant par les groupes de lettres comme les bigrammes (v. Dehaene *et al.* 2004 ; Vinckier *et al.* 2007). L'implication de la VWFA dans la reconnaissance de l'écrit se retrouve dans tous les systèmes d'écriture, alphabétiques ou non (v. Bolger, Perfetti & Schneider 2005), chez tous les lecteurs, enfants comme adultes (Houdé

*et al.* 2010). La VWFA est même activée chez les aveugles congénitaux qui utilisent un système de substitution tactile (le Braille ; v. Reich *et al.* 2011) ou sonore (Striem-Amit *et al.* 2012).



**Figure 1 : L'activation des régions représentées ici en noir (l'aire de la forme visuelle des mots ou VWFA, le cortex visuel – y compris le cortex visuel primaire – et le planum temporale) est modifiée par l'acquisition de littératie. Certaines connexions entre ces régions (indiquées par des flèches) peuvent également être renforcées, comme c'est le cas de la partie postérieure du faisceau arqué (représentée ici par une flèche noire et plus épaisse)**

La fonctionnalité de la VWFA n'est pas innée et ne se développe pas spontanément avec l'âge, ni avec l'exposition passive à un monde lettré. C'est l'apprentissage de la lecture qui y amplifie les réponses corticales à l'écrit et en augmente la sélectivité, comme démontré par les études longitudinales du processus d'acquisition de la lecture d'enfants (v. Ben-Shachar *et al.* 2011 ; Saygin *et al.* 2016) ou d'adultes (un cas unique ; v. Braga *et al.* 2017). Chez les enfants de cinq ans, cette région ne montre une sélectivité de réponse pour les lettres que s'ils ont déjà appris à lire (Saygin *et al.* 2016). De même, les réponses aux caractères de l'hébreu sont bien plus fortes chez les lecteurs de l'hébreu (que ce soit leur langue maternelle ou non) que chez des anglophones ne lisant pas l'hébreu (Baker *et al.* 2007). Et si le cerveau d'adultes francophones ne lisant pas le chinois s'active à la présentation de caractères chinois, cette activation est bilatérale et inclut la région occipitale latérale de l'hémisphère droit (Szwed

*et al.* 2014) impliquée dans la reconnaissance des objets. Les études électrophysiologiques vont dans le même sens : la latéralisation gauche de la composante N170 générée par le cortex occipito-temporal (qui inclut la VWFA) n'est observée pour des caractères japonais que chez les lecteurs du japonais (Maurer, Zevin & McCandliss 2008). La fonctionnalité de la VWFA, y compris sa sélectivité et sa latéralisation gauche, dépend donc bien de l'expérience acquise dans un système d'écriture.

Bien que l'expérience avec l'écrit soit cruciale, elle ne doit pas être très poussée pour déclencher la fonctionnalité de la VWFA. Quelques semaines d'entraînement de pré-lecteurs de six ans à l'appariement entre graphèmes (lettre ou groupe de lettres) et phonèmes suffisent, même s'ils ne décodent que 30 % de mots courts et fréquents (Brem *et al.* 2010). Donc, le tout début de la fonctionnalité de la VWFA coïncide avec l'acquisition des correspondances graphème-phonème (CGPs), ce qui illustre bien qu'un niveau de littératie rudimentaire est suffisant pour la stimuler. De même, chez des adultes maîtrisant déjà un premier script, un bref entraînement intensif à la reconnaissance des caractères d'un nouveau script (artificiel ou inconnu) suffit à déclencher l'activation de la VWFA (v. Mei *et al.* 2013 ; Yoncheva *et al.* 2010).

Chez les lecteurs d'un script donné, le niveau d'activation et la latéralisation gauche de la réponse cérébrale aux séquences écrites dépendent du niveau de compétence en lecture. Ainsi, les apprentis-lecteurs montrent des degrés d'activation et de latéralisation gauche moindres que les lecteurs habiles. Cela est le cas tant chez les enfants (v. Brem *et al.* 2010 ; Shaywitz *et al.* 2002) que chez les adultes ayant appris à lire tardivement et dont le niveau de lecture reste généralement assez faible. En étudiant des adultes illettrés, ex-illettrés, et lettrés pendant l'enfance, nous avons observé une corrélation positive entre l'activation cérébrale (IRMf) et la vitesse de lecture : l'apprentissage de la lecture augmente linéairement les réponses de la VWFA aux mots, pseudomots et phrases écrites (Dehaene *et al.* 2010b). Chez les mêmes participants, la latéralisation gauche de la N170 évoquée par l'écrit est aussi corrélée positivement avec la vitesse de lecture (Pegado *et al.* 2014). Ces résultats montrent que l'augmentation de la force et de la latéralisation des réponses de la VWFA est davantage liée au niveau de lecture qu'à l'âge ou à l'exposition passive à l'écrit. Ils confirment aussi que l'apprentissage de la lecture implique un processus d'élagage sélectif. Initialement, les mots écrits sont traités tant dans la VWFA que dans l'aire homologue de l'hémisphère droit. Avec l'apprentissage, l'activation de cette dernière diminue (v. aussi Turkeltaub *et al.* 2003). Le réseau cérébral mobilisé par la lecture est donc plus large chez les lecteurs débutants que chez les lecteurs habiles.

De plus, chez les lecteurs débutants, la lecture recrute davantage des régions fronto-pariétales (v. Braga *et al.* 2017 ; Dehaene *et al.* 2010b) impliquées dans l'attention sélective et le contrôle du comportement (celles sous-tendant les fonctions dites « exécutives »). Ce patron d'activation est aussi présenté par

des adultes bons lecteurs qui s'efforcent de lire des mots dégradés (Cohen *et al.* 2008) ou des pseudomots (v. Binder *et al.* 2005). Cela s'accompagne d'un fort effet de longueur : plus la séquence contient de lettres, plus elle est difficile à identifier (Cohen *et al.* 2008), ce qui reflète une lecture séquentielle, lente et attentive, par décodage grapho-phonémique. En situation normale, les lecteurs habiles présentent un effet de longueur fortement atténué par rapport aux apprentis-lecteurs (v. Samuels, LaBerge & Bremer 1978 ; Zoccolotti *et al.* 2005), et l'activation un peu plus antérieure de la VWFA observée chez eux (Pinel *et al.* 2015) suggère aussi une extraction d'unités orthographiques plus larges que la lettre.

La conséquence principale de l'apprentissage de la lecture au niveau cérébral est donc l'émergence, dans une sous-région du cortex occipito-temporal ventral gauche, d'une aire sous-tendant l'habileté à reconnaître les caractères écrits et leurs combinaisons. L'activité neurale évoquée par des mots écrits augmente, devient sélective, et converge sur le réseau de lecture observé chez le lecteur habile. Chez celui-ci, les processus de lecture peuvent toutefois varier en fonction du matériel, puisque certains mots ont une graphie si exceptionnelle (p. ex. *femme, monsieur*) qu'ils ne peuvent pas être lus à partir des règles de conversion graphème-phonème. Ainsi, leur lecture, comme celle des mots fréquents, implique davantage une voie « ventrale » ou « sémantique » qui, partant du cortex visuel primaire en passant par la VWFA, fait intervenir le gyrus temporal moyen et la région temporale basale ainsi que la partie triangulaire du gyrus frontal inférieur, alors que la lecture de mots de basse fréquence et de pseudomots exige de recourir au décodage, et donc repose plus sur une voie dite « dorsale » qui fait intervenir les aires temporales supérieures, le gyrus supra-marginal et la partie operculaire du gyrus frontal inférieur (Jobard, Crivello & Tzourio-Mazoyer 2003).

L'apprentissage de l'écrit induit aussi des changements qualitatifs dans le traitement visuel des lettres et séquences de lettres. Les lettres se présentent en séquences denses, ce qui nécessite un traitement plus focalisé que d'autres symboles et donc requiert de limiter l'intégration de caractéristiques inappropriées de stimulus voisins (v. Fernandes *et al.* 2014 ; Grainger, Tydgat & Isselé 2010). De plus, l'acquisition de la lecture augmente la sensibilité du cortex visuel occipital (y compris primaire ; cf. Fig. 1) et occipito-temporal aux différences fines entre séquences de lettres et même entre objets non linguistiques (v. Dehaene *et al.* 2010a ; Pegado *et al.* 2014).

Enfin, l'acquisition de l'écrit augmente la sensibilité du cortex occipito-temporal aux différences d'orientation en miroir (Pegado *et al.* 2014). Ce changement va à l'encontre du principe d'« invariance en miroir » typique du système de reconnaissance des objets : l'orientation latérale (gauche-droite) n'est pas un critère pertinent pour l'identification de la plupart des êtres vivants et des objets, dont les profils droit et gauche sont des images en miroir. En revanche, pour distinguer <b> de <d> et <bon> de <don>, il faut « désapprendre » ou

inhiber la généralisation en miroir (v. Borst *et al.* 2015 ; Dehaene *et al.* 2010a). C'est ce que font les lecteurs de scripts qui incluent des lettres en miroir, comme l'alphabet latin, mais ne font pas les enfants pré-lecteurs (Fernandes, Leite & Kolinsky 2016), ni les adultes illettrés (v. Kolinsky *et al.* 2011), ni les lettrés dans un script qui n'a pas de caractères en miroir (Pederson 2003). Ces derniers, comme les pré-lecteurs et les illettrés, ont beaucoup de difficulté à discriminer les images en miroir. Chez les lecteurs des nombreux scripts qui contiennent des images en miroir, la capacité à les discriminer n'est pas limitée aux lettres : elle se généralise partiellement à d'autres catégories visuelles (y compris aux objets usuels ; v. Fernandes & Kolinsky 2013) et devient tellement automatique qu'elle interfère avec la capacité à discriminer les objets sur base de leur identité, *i.e.* indépendamment de leur orientation (Fernandes, Leite & Kolinsky 2016 ; Kolinsky & Fernandes 2014 ; Pegado, Nakamura & Hannagan 2014). Cette *compétition* entre d'anciens processus valides dans l'environnement naturel et ceux requis par la lecture de scripts comportant des images en miroir a lieu en partie au sein de la VWFA (mais v. Nakamura, Makuuchi & Nakajima 2014 ; Pegado, Nakamura & Hannagan 2014 pour plus de détails). En effet, une forte diminution de son activation est observée lors de la présentation répétée d'une image aussi bien quand le second stimulus est identique au premier que quand il est son image en miroir. Chez le lecteur habile, cela s'observe pour des stimulus non linguistiques, mais pas pour les mots écrits (Dehaene *et al.* 2010a) ou les lettres (Pegado *et al.* 2011).

La compétition entre la lecture et d'autres fonctions plus anciennes est en fait plus générale. Comme la VWFA fait partie de la voie ventrale de reconnaissance des objets, son émergence fonctionnelle entraîne une réorganisation des préférences de réponse aux autres catégories visuelles, surtout aux visages. Ainsi, chez les lecteurs, le traitement des visages repose moins sur le gyrus fusiforme gauche (Braga *et al.* 2017 ; Dehaene *et al.* 2010b) et plus sur l'aire homologue de l'hémisphère droit (Dehaene *et al.* 2010b). Cette réorganisation ne semble pas induire de « coût » cognitif mais permet, au contraire, de mieux adapter l'attention de manière flexible aux besoins de la tâche (Ventura *et al.* 2013).

Au cours de l'acquisition de la littératie, la VWFA acquiert donc une fonctionnalité, une spécificité et de nouvelles propriétés (comme la non-invariance en miroir pour l'écrit), distinctes de celles des aires voisines. Sa spécialisation mène à une diminution de sa connectivité fonctionnelle avec d'autres aires de haut niveau du réseau visuel (López-Barroso *et al.* en révision).

### **3. L'APPRENTISSAGE DE LA LECTURE MODIFIE LE TRAITEMENT, LES REPRÉSENTATIONS ET LA MÉMORISATION DU LANGAGE PARLÉ**

Chez les lecteurs, mais pas chez les adultes illettrés, voir la forme écrite d'une phrase active l'ensemble des aires du langage parlé, à l'exception du cortex

auditif primaire et ses alentours. Ces activations atteignent dans la plupart des régions une intensité équivalente à celle évoquée par le langage parlé, menant ainsi à un recouvrement important des régions cérébrales activées à la fois par l'écrit et par la parole (Dehaene *et al.* 2010b). Cette découverte spectaculaire n'est pas surprenante, car l'objet de la lecture est justement de restituer le langage parlé à partir de la vision, nous offrant ainsi une mémoire externe durable.

Il est bien plus surprenant de constater à quel point la littératie module le traitement et les représentations du langage parlé. Il était connu depuis la fin des années 70 que la littératie alphabétique et la prise de conscience des phonèmes se développent en interaction (cf. discussion dans Morais, Alegria & Content 1987). Les chercheurs se sont surtout intéressés au rôle de la conscience phonémique dans l'acquisition de la lecture (v. Piquard-Kipffer & Sprenger-Charolles 2013). Il n'en reste pas moins que la conscience phonémique ne se développe fortement que chez les personnes qui ont appris à lire dans un système alphabétique. La plupart des pré-lecteurs (Liberman *et al.* 1974) et des adultes analphabètes (totalement illettrés – v. Morais *et al.* 1979 – ou lettrés dans un système non-alphabétique – v. Read *et al.* 1986) présentent beaucoup de difficultés à effectuer des jeux de langage tels que dénombrer les phonèmes (3 dans « bol », tout comme dans « jour ») ou supprimer le premier phonème d'un mot (« bol » devenant « ol » et « jour », « our »). Depuis lors, les travaux d'imagerie fonctionnelle ont montré que la littératie modifie aussi le réseau cérébral du langage parlé de trois autres manières.

La littératie mène à intégrer d'autres aires cérébrales au réseau du langage parlé, permettant des interactions bidirectionnelles entre langage parlé et écrit. Le traitement du langage parlé s'en trouve modifié. En effet, chez les adultes lettrés (mais pas chez les illettrés ; Dehaene *et al.* 2010b) et chez les enfants après trois ans d'apprentissage de la lecture (Monzalvo & Dehaene-Lambertz 2013), l'écoute de mots parlés active la VWFA, reflétant l'activation de représentations orthographiques par les mots parlés. De nombreuses études comportementales ont montré que, en devenant capables de lire, nous ne traitons plus les mots parlés sans être influencés par les représentations écrites correspondantes. Ainsi, dans une situation purement auditive, les participants (lettrés) jugent plus rapidement que deux mots riment quand leur rime orthographique est identique (p. ex. *blanc-franc*) que quand elle diffère (*blanc-cran* ; Seidenberg & Tanenhaus 1979). Les représentations mentales de l'orthographe influencent même les processus de reconnaissance en ligne des mots parlés. Lorsqu'ils doivent décider le plus rapidement possible si des séquences parlées sont ou non des mots, les auditeurs sont plus rapides pour des mots consistants du point de vue phono-graphémique, comme « biche » (dont la rime ne s'écrit que d'une façon en français) que pour des mots inconsistants, comme « caisse » (dont la rime peut s'écrire autrement, comme dans *messe*, Ziegler & Ferrand 1998). Les adultes lettrés ont aussi recours à leurs connaissances orthographiques lors de la mémorisation d'informations phonologiques prêtant à confusion. Alors qu'ils retiennent moins bien une liste de mots parlés lorsque ceux-ci riment (p. ex. *passee, chasse, classe, masse*, etc.) que

lorsqu'ils ne riment pas, cet effet délétère de la similarité phonologique inter-items est réduit lorsque les rimes n'ont pas toutes la même orthographe, comme dans « nord, corps, sport, flore, etc. » (Pattamadilok *et al.* 2010).

La littératie conduit aussi à une augmentation des réponses au langage parlé dans les régions temporales supérieures gauches impliquées dans l'analyse phonologique. En particulier, le planum temporale (Fig. 1), qui joue un rôle crucial dans le codage perceptif des phonèmes (p. ex. Mesgarani *et al.* 2014), s'active doublement chez les adultes lettrés par rapport aux illettrés (Dehaene *et al.* 2010b). Chez les enfants, cet effet s'installe après quelques mois d'apprentissage de la lecture (Monzalvo & Dehaene-Lambertz 2013). Les études comportementales suggèrent qu'il reflèterait un changement dans un ou plusieurs types de représentations phonologiques. Même si les illettrés possèdent une phonologie implicite (ils discriminent bien des syllabes comme /pa/ et /ba/ ; v. Scliar-Cabral *et al.* 1997), ils ne perçoivent pas aussi nettement que les lettrés la transition entre phonèmes dans un continuum acoustique, ce qui suggère que les frontières entre phonèmes sont moins précises (Serniclaes *et al.* 2005). Par ailleurs, même si le planum temporale ne répond pas aux mots écrits (Dehaene *et al.* 2010b) ni aux lettres isolées (Van Atteveldt *et al.* 2004) chez les lecteurs, son activation est renforcée quand une lettre congruente est présentée simultanément à un phonème (v. Van Atteveldt *et al.* 2004). Donc, son activation est modulée par rétroaction de régions multimodales (sulcus et gyrus temporal supérieur) qui participent à l'intégration audiovisuelle des lettres et phonèmes.

Enfin, ces changements fonctionnels s'accompagnent de changements anatomiques, notamment de connectivité, qui est renforcée aux niveaux intra- et inter-hémisphériques. Ainsi, le faisceau arqué (Fig. 1) change en fonction de la compétence en lecture, chez les enfants (v. Yeatman *et al.* 2012) et chez les adultes (Thiebaut de Schotten *et al.* 2014). Cet ensemble d'axones relie la VWFA au planum temporale et pourrait participer à la voie de lecture basée sur la conversion graphème-phonème, qui est au cœur de la littératie car cruciale pour la constitution de représentations orthographiques (Share 1995). Chez les adultes, la force de la connectivité fonctionnelle entre la VWFA et le réseau dorsal du langage (incluant des aires pariétales et dorsales – y compris l'aire de Broca) augmente aussi avec la littératie (López-Barroso *et al.* en révision). La connectivité inter-hémisphérique (corps calleux) et la densité de matière grise dans diverses régions impliquées dans la lecture sont elles aussi renforcées par l'acquisition de l'écrit (Carreiras *et al.* 2009 ; Castro-Caldas *et al.* 1999 ; Petersson *et al.* 2007).

#### **4. TANT LE SUCCÈS DE L'APPRENTISSAGE DE LA LECTURE QUE LES MODIFICATIONS CÉRÉBRALES ASSOCIÉES DÉPENDENT DE LA MÉTHODE D'INSTRUCTION**

Beaucoup d'études de psycholinguistique expérimentale ont comparé l'efficacité des méthodes d'alphabétisation de l'enfant. Leurs données sont cohérentes avec

celles provenant d'études à grande échelle (p. ex. aux États-Unis, celles du *National Reading Panel* 2000 et du *National Research Council*, v. Snow, Burns & Griffin 1998 ; pour la France, voir le rapport de l'*Observatoire National de la Lecture* (ONL 1998) et Morais 2016) et montrent que l'instruction explicite des CGPs (méthode *phonique*) mène aux meilleurs résultats en lecture, permettant de former rapidement des lecteurs autonomes, *i.e.* capables de décoder des mots jamais rencontrés auparavant (v. Ehri *et al.* 2001).

La méthode phonique met l'accent sur la compréhension du principe alphabétique (l'intuition du fait que les graphèmes correspondent à des phonèmes) et la maîtrise du code orthographique, dont la difficulté est très variable car les codes présentent des degrés divers d'inconsistance, en raison de l'économie même des scripts alphabétiques (un petit nombre de symboles permet d'écrire un nombre indéfiniment élevé de mots) et de facteurs historiques, y compris les emprunts à d'autres langues. En français, le même graphème est utilisé pour représenter différents phonèmes dans des mots différents (<ch> dans *chœur* vs dans *chat*) et, inversement, le même phonème est écrit différemment dans des mots différents (/ʃ/ dans *rond*, *long*, *ton*). Les apprenants doivent donc maîtriser le code orthographique de leur langue lorsqu'ils commencent à décoder (en lecture) et recoder (en écriture). C'est pourquoi, il faut enseigner systématiquement toutes les GPC majeures (Ehri *et al.* 2001).

Il semble en être de même chez l'adulte. Plusieurs études sur l'apprentissage d'un script artificiel ont comparé une méthode (phonique) attirant l'attention des apprenants sur les associations entre les CGPs du nouveau script à une méthode (globale) insistant sur la mémorisation du mot entier. Toutes ont rapporté une plus grande efficacité de la méthode phonique (v. Bishop 1964 ; Bitan *et al.* 2005 ; Yoncheva *et al.* 2010). Ainsi, dans l'étude de Y. N. Yoncheva *et al.* (2010), alors que l'apprentissage global menait à une meilleure reconnaissance des mots appris lors de l'entraînement, seuls les apprenants de la méthode phonique étaient devenus capables de décoder des mots nouveaux, formés avec les caractères appris du script. Seuls eux, donc, avaient développé une lecture autonome. Nous n'avons que peu d'indications sur l'apprentissage de la lecture par des adultes entièrement illettrés, mais tant l'observation d'un cas unique (Braga *et al.* 2017) qu'une étude d'instruction du code alphabétique menée sur huit adultes au départ totalement illettrés (Kolinsky *et al.* 2018) suggèrent qu'il en est de même.

Cette différence de performance en fonction des méthodes est associée à des différences cérébrales. Y. N. Yoncheva *et al.* (2010) constatèrent que, pendant la lecture, la composante N170 était latéralisée dans l'hémisphère gauche pour le groupe phonique, mais dans l'hémisphère droit pour le groupe ayant appris les associations avec les mots entiers. D'autres études ont confirmé, via l'IRMf, une activation plus latéralisée à gauche en réponse aux mots après un apprentissage phonique plutôt que logographique (Mei *et al.* 2013) ou alpha-syllabique (Hirshorn *et al.* 2016). L'ensemble des résultats montre que l'attention sélective

aux CGPs pendant l'apprentissage stimule la latéralisation des circuits neuro-naux qui sous-tendent la reconnaissance des mots écrits et aide les apprenants à devenir rapidement des lecteurs autonomes. En revanche, un entraînement à reconnaître les mots par leur forme globale est associé à une activité cérébrale plus prononcée dans l'hémisphère droit et mobilise un circuit qui paraît inapproprié, puisque son implication, majoritairement présente en tout début d'apprentissage, diminue lorsque celui-ci progresse (v. Braga *et al.* 2017 ; Dehaene *et al.* 2010b).

Ces données sont d'autant plus importantes que l'avantage de l'instruction phonique se marque particulièrement chez les enfants issus d'un milieu défavorisé. Cela a été suggéré par une méta-analyse portant sur l'apprentissage de l'anglais (Ehri *et al.* 2001) et, en France, par une enquête menée auprès de plusieurs centaines d'élèves de première année (CP). J. Deauvieu, J. Reichstadt et J.-P. Terrail (2015) ont comparé quatre méthodes d'enseignement différentes, dont deux de type phonique. L'avantage des méthodes phoniques, en lecture de mots, compréhension en lecture, orthographe et production écrite, était significativement plus fort pour les enfants de parents moins éduqués. En moyenne, quand aucun des parents n'avait le bac, la méthode menant aux pires résultats en lecture-écriture était la plus globale : 36.4 % contre 62.6 % pour la plus phonique. Pour les enfants dont au moins un parent avait le bac, les scores ont été 56.1 % et 68.6 % respectivement. La différence entre les deux milieux, d'environ 20 % avec la méthode globale, était donc réduite à 6 % avec la méthode phonique. Dans les deux cas, la méthode phonique a été la meilleure. Par rapport à la globale, elle représentait un gain d'environ 26 %, si le niveau de scolarité parental était bas, et permettait tout de même un gain de plus de 12 % s'il était plus élevé.

## **5. IMPLICATIONS POUR LES ÉDUCATEURS ET CLINIENS**

Nous commençons à bien comprendre les processus et les réseaux cérébraux modifiés par la littératie, ce qui nous permet de réfléchir à la façon d'optimiser l'acquisition de la lecture, en particulier pour les personnes défavorisées du point de vue socioculturel et/ou en difficulté d'apprentissage. Les données que nous avons présentées sur les méthodes d'apprentissage de la lecture sont tout à fait claires sur ce point : quelles que soient les raisons sociohistoriques du maintien de la méthode globale dans de nombreux pays (pour une discussion, v. Morais *à par.*), il est indéniable qu'elle accentue le fossé en matière d'alphabétisation entre les apprenants issus d'un milieu socioculturel défavorisé et ceux provenant de milieux plus privilégiés. Par ailleurs, la méthode phonique est plus efficace pour tous, quel que soit le milieu d'origine, et devrait donc être préférée. Néanmoins, il reste à en spécifier de nombreux détails, notamment quel serait l'ordre idéal dans lequel introduire les diverses CGPs pour un code donné. Divers principes généraux peuvent être énoncés (p. ex. commencer l'apprentissage par les graphèmes simples et consistants, éviter les paires de lettres en miroir en début d'apprentissage ; v. Kolinsky *et al.* 2018), mais leur poids relatif reste incertain.

De plus, si ici nous nous sommes concentrés sur la lecture, l'apprentissage de l'écriture est lui aussi crucial, car il semble renforcer celui de la lecture chez les enfants (James 2010) et les adultes (v. Longcamp *et al.* 2008).

Par ailleurs, les rares données sur l'apprentissage de la lecture par des adultes totalement illettrés suggèrent qu'il est possible d'apprendre à lire pour la première fois même à un âge mûr : le cas unique rapporté par L. W. Braga *et al.* (2017) avait 45 ans en début d'apprentissage, et au moins un des apprenants de R. Kolinsky *et al.* (2018) avait 55 ans. Comme l'illettrisme adulte condamne souvent à la pauvreté, à la mauvaise santé et à l'exclusion sociale, non seulement les adultes illettrés mais aussi leurs enfants (v. Post 2016), il est important d'adapter les méthodes d'alphabetisation à ces personnes.

Les données discutées ici peuvent aussi nous aider à mieux cerner la pathogénèse de la dyslexie de développement, un trouble spécifique de l'acquisition de la lecture. En effet, de nombreuses explications causales en ont été proposées sur base des différences comportementales et/ou cérébrales constatées chez les individus affectés. Toutefois, ces différences pourraient ne pas être liées à des causes de la dyslexie, mais être des conséquences secondaires d'une expérience de lecture réduite ou sous-optimale (cf. discussions dans Goswami 2015 ; Huettig *et al.* 2018). En effet, certaines de ces différences sont aussi observées chez les adultes restés illettrés pour des raisons strictement socio-économiques ainsi que chez les enfants pré-lecteurs. Par exemple, le fait que les dyslexiques présentent une activation réduite du planum temporale en réponse à la parole a été interprété comme une cause proximale de leur déficit de lecture (Blau *et al.* 2010). Cependant, l'observation d'une réduction similaire chez les adultes illettrés (Dehaene *et al.* 2010b) et les enfants pré-lecteurs (Monzalvo & Dehaene-Lambertz 2013) suggère que le faible niveau de lecture en est la cause réelle.

Au-delà de ce problème de l'œuf et de la poule, il faut se garder de tomber dans le piège qui consisterait à considérer les corrélats neuronaux de l'apprentissage de la lecture comme des facteurs favorisant cet apprentissage. Par exemple, s'il est vrai qu'un apprentissage réussi mène à une latéralisation gauche des réponses cérébrales à l'écrit, il n'est en rien garanti (et il paraît même peu probable, bien que cela doive être étudié) qu'il soit utile de « pousser » cette latéralisation par d'autres moyens que l'apprentissage intensif de l'écrit lui-même.

## **6. CONSIDÉRATIONS ÉTHIQUES ET SOCIO-POLITIQUES**

Si l'on considère que la littératie de base consiste en l'utilisation régulière de l'habileté à lire et écrire des mots de manière automatique (et non pas seulement *via* le décodage), les raisons pour la reconnaître comme faisant partie des droits de tout être humain dans la société contemporaine sont multiples. Étant donné son influence sur beaucoup de fonctions cognitives, y compris la pensée, la mémoire, la capacité de raisonnement, de critique et d'argumentation, elle assure l'acquisition, l'évaluation et la création de connaissances ainsi que leur

communication ; en tant qu'instrument narratif, elle est un véhicule culturel, existentiel et esthétique irremplaçable ; en tant que facteur de cohésion sociale, elle est indispensable au fonctionnement démocratique des communautés. De plus, les profondes inégalités actuelles en littératie sont cause, autant que conséquence, des énormes inégalités entre les individus et entre les classes et les nations en termes de ressources matérielles, santé, conditions et qualité de vie.

On évoque aujourd'hui dans plusieurs pays la possibilité d'établir un revenu universel de base pour pallier les effets néfastes du système socio-économique et financier. Nous ne nous prononcerons pas sur cette question qui sort de notre compétence. Nous disons seulement que tout le monde devrait trouver souhaitable, bien que personne ne l'ait encore réclamé, la mise sur pied – faisable au regard des sciences et des neurosciences cognitives, et qui aurait des effets extrêmement positifs sur la vie individuelle et sociale – d'un système d'éducation publique d'enfants et d'adultes qui assurerait une littératie universelle de base telle que définie *supra*.

Si les inégalités en littératie dans le monde et dans les pays moins développés sont gigantesques, celles qui existent au sein même des pays développés sont beaucoup plus grandes qu'on ne le croit, habitués que nous sommes à vivre entre lettrés. Un bref portrait, limité à la France, devrait être éclairant.

L'étude *Skills Matter* de l'OCDE (2015) a défini cinq niveaux de compréhension en lecture. En dessous du niveau 1, la pièce d'information à rechercher est identique dans sa forme même à celle présente dans le texte et, au niveau 1, la signification des phrases peut être trouvée en reconnaissant des mots très courants. Parmi les Français de 16 à 65 ans, 23 % ne dépassent pas ce niveau (c'est plus que la moyenne – 19 % – des 24 pays de l'OCDE qui ont participé à cette étude). Le niveau 2, dont l'exigence est très modeste, consistant notamment à pouvoir paraphraser ou intégrer certains passages et faire des inférences simples, n'est pas dépassé par 58 % des Français (la moyenne de l'OCDE est de 54 %).

En ce qui concerne les adolescents scolarisés de 15 ans (OCDE 2016), avec une échelle à six niveaux, le niveau 2 n'a pas été atteint par 20 % des Français et le niveau 3 par 41 %. Ce qui est particulièrement inquiétant, c'est l'augmentation des inégalités entre 2002 et 2015 : les très bons lecteurs (niveaux 5 et 6) sont passés de 12 à 15,5 % – en soi une bonne nouvelle –, tandis que les très mauvais lecteurs (n'atteignant pas le niveau 2) sont passés de 14 à 22 %. La France fut le seul pays de l'OCDE à connaître une augmentation si importante de l'écart en littératie. Quelles en sont les raisons ? Lorsque ces adolescents seront adultes, comment leur expliquerons-nous que, malgré toutes nos connaissances des processus cognitifs et cérébraux, dont bon nombre ont été rendues publiques notamment par les rapports de l'ONL, la France puisse être encore plus loin qu'aujourd'hui de l'espoir d'une littératie universelle ?

## Références bibliographiques

- BAKER C. I. *et al.* (2007), "Visual word processing and experiential origins of functional selectivity in human extrastriate cortex", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104 (21), 9087-9092.
- BEN-SHACHAR M. *et al.* (2011), "The development of cortical sensitivity to visual word forms", *Journal of Cognitive Neuroscience* 23 (9), 2387-2399.
- BINDER J. R. *et al.* (2005), "Some neurophysiological constraints on models of word naming", *Neuroimage* 27 (3), 677-693.
- BISHOP C. H. (1964), "Transfer effects of word and letter training in reading 1", *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 3 (3), 215-221.
- BITAN T. *et al.* (2005), "Effects of alphabeticality, practice and type of instruction on reading an artificial script: An fMRI study", *Cognitive Brain Research* 25 (1), 90-106.
- BLAU V. *et al.* (2010), "Deviant processing of letters and speech sounds as proximate cause of reading failure: A functional magnetic resonance imaging study of dyslexic children", *Brain* 133 (3), 868-879.
- 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.
- BORST G. *et al.* (2015), "The cost of blocking the mirror generalization process in reading: Evidence for the role of inhibitory control in discriminating letters with lateral mirror-image counterparts", *Psychonomic Bulletin & Review* 22 (1), 228-234.
- BRAGA L. W. *et al.* (2017), "Tracking adult literacy acquisition with functional MRI: A single-case study", *Mind, Brain, and Education* 11 (3), 121-132.
- BREM S. *et al.* (2010), "Brain sensitivity to print emerges when children learn letter-speech sound correspondences", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107 (17), 7939-7944.
- CARREIRAS M. *et al.* (2009), "An anatomical signature for literacy", *Nature* 461, 983-986.
- CASTRO-CALDAS A. *et al.* (1999), "Influence of learning to read and write on the morphology of the corpus callosum", *European Journal of Neurology* 6 (1), 23-28.
- COHEN L. *et al.* (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 (2), 291-307.
- COHEN L. *et al.* (2002), "Language-specific tuning of visual cortex? Functional properties of the visual word form area", *Brain* 125 (5), 1054-1069.
- COHEN L. *et al.* (2003), "Visual word recognition in the left and right hemispheres: Anatomical and functional correlates of peripheral alexias", *Cerebral Cortex* 13 (12), 1313-1333.
- COHEN L. *et al.* (2008), "Reading normal and degraded words: Contribution of the dorsal and ventral visual pathways", *Neuroimage* 40 (1), 353-366.
- DEAUVIEAU J., REICHSTADT J. & TERRAIL J.-P. (2015), *Enseigner efficacement la lecture : une enquête et ses implications*, Paris, Odile Jacob.
- DEHAENE S. & COHEN L. (2007), "Cultural recycling of cortical maps", *Neuron* 56 (2), 384-398.
- DEHAENE S. *et al.* (2001), "Cerebral mechanisms of word masking and unconscious repetition priming", *Nature Neuroscience* 4 (7), 752-758.
- DEHAENE S. *et al.* (2002), "The visual word form area: A prelexical representation of visual words in the fusiform gyrus", *NeuroReport* 13 (3), 321-325.
- DEHAENE S. *et al.* (2004), "Letter binding and invariant recognition of masked words: Behavioral and neuroimaging evidence", *Psychological Science* 15 (5), 307-313.

- DEHAENE S. *et al.* (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.
- DEHAENE S. *et al.* (2010b), "How learning to read changes the cortical networks for vision and language", *Science* 330 (6009), 1359-1364.
- DÉJERINE J. (1892), « Contribution à l'étude anatomo-pathologique et clinique des différentes variétés de cécité verbale », *Mémoires de la Société de Biologie* 4, 61-90.
- EHRI L. C. *et al.* (2001a), "Systematic phonics instruction helps students learn to read: Evidence from the National Reading Panel's meta-analysis", *Review of Educational Research* 71 (3), 393-447.
- EHRI L. C. *et al.* (2001b), "Phonemic awareness instruction helps children learn to read: Evidence from the National Reading Panel's meta-analysis", *Reading Research Quarterly* 36 (3), 250-287.
- FERNANDES T. & KOLINSKY R. (2013), "From hand to eye: The role of literacy, familiarity, graspability, and vision-for-action on enantiomorphy", *Acta Psychologica* 142 (1), 51-61.
- FERNANDES T., LEITE I. & KOLINSKY R. (2016), "Into the looking glass: Literacy acquisition and mirror invariance in preschool and first-grade children", *Child Development* 87 (6), 2008-2025.
- FERNANDES T. *et al.* (2014), "The deficit of letter processing in developmental dyslexia: Combining evidence from dyslexics, typical readers, and illiterate adults", *Developmental Science* 17 (1), 125-141.
- GAILLARD R. *et al.* (2006), "Direct intracranial, FMRI, and lesion evidence for the causal role of left inferotemporal cortex in reading", *Neuron* 50 (2), 191-204.
- GOSWAMI U. (2015), "Sensory theories of developmental dyslexia: Three challenges for research", *Nature Reviews Neuroscience* 16 (1), 43-54.
- GRAINGER J., TYDGAT I. & ISSELÉ J. (2010), "Crowding affects letters and symbols differently", *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 36 (3), 673-688.
- HIRSHORN E. A. *et al.* (2016), "Fusiform gyrus laterality in writing systems with different mapping principles: An artificial orthography training study", *Journal of Cognitive Neuroscience* 28 (6), 882-894.
- HOUDÉ O. *et al.* (2010), "Mapping numerical processing, reading, and executive functions in the developing brain: An fMRI meta-analysis of 52 studies including 842 children", *Developmental Science* 13 (6), 876-885.
- HUETTIG F. *et al.* (2018), "Distinguishing cause from effect – many deficits associated with developmental dyslexia may be a consequence of reduced and suboptimal reading experience", *Language, Cognition and Neuroscience* 33 (3), 333-350.
- JAMES K. H. (2010), "Sensori-motor experience leads to changes in visual processing in the developing brain", *Developmental Science* 13 (2), 279-288.
- JOBARD G., CRIVELLO F. & TZOURIO-MAZOYER N. (2003), "Evaluation of the dual route theory of reading: A metanalysis of 35 neuroimaging studies", *Neuroimage* 20 (2), 693-712.
- KOLINSKY R. & FERNANDES T. (2014), "A cultural side effect: Learning to read interferes with identify processing of familiar objects", *Frontiers in Psychology* 5, 1224.
- KOLINSKY R. *et al.* (2011), "Enantiomorphy through the looking glass: Literacy effects on mirror-image discrimination", *Journal of Experimental Psychology: General* 140 (2), 210-238.
- KOLINSKY R. *et al.* (2018), "Completely illiterate adults can learn to decode in three months", *Reading and Writing* 31 (3), 649-677.
- LIBERMAN I. Y. *et al.* (1974), "Explicit syllable and phoneme segmentation in the young child", *Journal of Experimental Child Psychology* 18 (2), 201-212.

- LONGCAMP M. *et al.* (2008), "Learning through hand- or typewriting influences visual recognition of new graphic shapes: Behavioral and functional imaging evidence", *Journal of Cognitive Neuroscience* 20 (5), 802-815.
- LÓPEZ-BARROSO D. *et al.* (en révision), "The impact of schooling and literacy on the functional connectivity of vision and language-related networks", *Cerebral Cortex*.
- 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", *Journal of Cognitive Neuroscience* 20 (10), 1878-1891.
- MEI L. *et al.* (2013), "Orthographic transparency modulates the functional asymmetry in the fusiform cortex: An artificial language training study", *Brain & Language* 125 (2), 165-172.
- MESGARANI N. *et al.* (2014), "Phonetic feature encoding in human superior temporal gyrus", *Science* 343 (6174), 1006-1010.
- MONZALVO K. & DEHAENE-LAMBERTZ G. (2013), "How reading acquisition changes children's spoken language network", *Brain and Language* 127 (3), 356-365.
- MORAIS J. (2016), *Lire, écrire et être libre : de l'alphabétisation à la démocratie*, Paris, Odile Jacob.
- MORAIS J. (à par.), "The methods issue revisited: From a developmental and a socio-cultural-political perspective", in T. Lachmann & T. Weis (eds.), *Reading and Dyslexia: From Basic Functions to Higher Order Cognition*, Berlin, Springer.
- MORAIS J., ALEGRIA J. & CONTENT A. (1987), "The relationships between segmental analysis and alphabetic literacy: An interactive view", *Cahiers de Psychologie Cognitive / Current Psychology of Cognition* 7 (5), 415-438.
- MORAIS J. *et al.* (1979), "Does awareness of speech as a sequence of phones arise spontaneously?", *Cognition* 7 (4), 323-331.
- NAKAMURA K., MAKUUCHI M. & NAKAJIMA Y. (2014), "Mirror-image discrimination in the literate brain: A causal role for the left occipitotemporal cortex", *Frontiers in Psychology* 5, 478.
- NATIONAL READING PANEL (2000), *Report of the National Reading Panel – Teaching Children to Read: An Evidence-Based Assessment of the Scientific Research Literature on Reading and its Implications for Reading Instruction*, Washington (DC), National Institute of Child Health and Human Development.
- NOBRE A. C., ALLISON T. & MCCARTHY G. (1994), "Word recognition in the human inferior temporal lobe", *Nature* 372 (6503), 260-263.
- OBSERVATOIRE NATIONAL DE LA LECTURE [ONL] (1998), *Apprendre à lire*, Paris, CNDP & Odile Jacob.
- OCDE (2016), *Résultats du PISA 2015 : l'excellence et l'équité dans l'éducation*, Paris, OCDE.
- OECD (2015), *Skills Matter: Further Results from the Survey of Adult Skills*, Paris, OECD.
- ONG W. J. (1982), *Orality and Literacy: The Technologizing of the Word*, New York (NY), Methuen.
- PATTAMADILOK C. *et al.* (2010), "Auditory word serial recall benefits from orthographic dissimilarity", *Language and Speech* 53 (3), 321-341.
- 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. & HANNAGAN T. (2014), "How does literacy break mirror invariance in the visual system?", *Frontiers in Psychology* 5, 703.
- PEGADO F. *et al.* (2011), "Breaking the symmetry: Mirror discrimination for single letters but not for pictures in the visual word form area", *Neuroimage* 55 (2), 742-749.
- PEGADO F. *et al.* (2014), "Timing the impact of literacy on visual processing", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111 (49), E5233-E5242.

- PETERSEN S. E. *et al.* (1988), "Positron emission tomographic studies of the cortical anatomy of single-word processing", *Nature* 331 (6157), 585-589.
- PETERSSON K. M. *et al.* (2007), "Literacy: A cultural influence on functional left-right differences in the inferior parietal cortex", *European Journal of Neuroscience* 26 (3), 791-799.
- PINEL P. *et al.* (2015), "Genetic and environmental influences on the visual word form and fusiform face areas", *Cerebral Cortex* 25 (9), 2478-2493.
- PIQUARD-KIPFFER A. & SPRENGER-CHAROLLES L. (2013), "Early predictors of future reading skills: A follow-up of French-speaking children from the beginning of kindergarten to the end of the second grade (age 5 to 8)", *L'Année psychologique* 113 (4), 491-521.
- POST D. (2016), "Adult literacy benefits? New opportunities for research into sustainable development", *International Review of Education* 62 (6), 751-770.
- PUCE A. *et al.* (1996), "Differential sensitivity of human visual cortex to faces, letterstrings, and textures: A functional magnetic resonance imaging study", *Journal of Neuroscience* 16 (16), 5205-5215.
- READ C. *et al.* (1986), "The ability to manipulate speech sounds depends on knowing alphabetic writing", *Cognition* 24 (1-2), 31-44.
- REICH L. *et al.* (2011), "A ventral visual stream reading center independent of visual experience", *Current Biology* 21 (5), 363-368.
- SAMUELS S. J., LABERGE D. & BREMER C. D. (1978), "Units of word recognition: Evidence for developmental changes", *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 17 (6), 715-720.
- SAYGIN Z. M. *et al.* (2016), "Connectivity precedes function in the development of the visual word form area", *Nature Neuroscience* 19 (9), 1250-1255.
- SCLIAR-CABRAL L. *et al.* (1997), "The awareness of phonemes: So close-so far away", *International Journal of Psycholinguistics* 13, 211-240.
- SEIDENBERG M. S. & TANENHAUS M. K. (1979), "Orthographic effects on rhyme monitoring", *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory* 5 (6), 546-554.
- SERNICLAES W. *et al.* (2005), "Categorical perception of speech sounds in illiterate adults", *Cognition* 98 (2), B35-B44.
- SHARE D. L. (1995), "Phonological recoding and self-teaching: *Sine qua non* of reading acquisition", *Cognition* 55 (2), 151-218.
- SHAYWITZ B. A. *et al.* (2002), "Disruption of posterior brain systems for reading in children with developmental dyslexia", *Biological Psychiatry* 52 (2), 101-110.
- SNOW C. E., BURNS M. S. & GRIFFIN P. [NATIONAL RESEARCH COUNCIL] (eds.) (1998), *Preventing Reading Difficulties in Young Children*, Washington (D.C.), National Academy Press.
- STRIEM-AMIT E. *et al.* (2012), "Reading with sounds: Sensory substitution selectively activates the visual word form area in the blind", *Neuron* 76 (3), 640-652.
- SZWED M. *et al.* (2014), "Effects of literacy in early visual and occipitotemporal areas of Chinese and French readers", *Journal of Cognitive Neuroscience* 26 (3), 459-475.
- THIEBAUT DE SCHOTTEN M. *et al.* (2014), "Learning to read improves the structure of the arcuate fasciculus", *Cerebral Cortex* 24 (4), 989-995.
- TURKELTAUD P. E. *et al.* (2003), "Development of neural mechanisms for reading", *Nature Neuroscience* 6 (7), 767-773.
- VAN ATTEVELDT N. *et al.* (2004), "Integration of letters and speech sounds in the human brain", *Neuron* 43 (2), 271-282.
- VENTURA P. *et al.* (2013), "Literacy acquisition reduces the influence of automatic holistic processing of faces and houses", *Neuroscience Letters* 554, 105-109.

- VINCKIER F. *et al.* (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.
- YEATMAN J. D. *et al.* (2012), "Development of white matter and reading skills", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109 (44), E3045-E3053.
- YONCHEVA Y. N. *et al.* (2010), "Attentional focus during learning impacts N170 ERP responses to an artificial script", *Developmental Neuropsychology* 35 (4), 423-445.
- ZIEGLER J. C. & FERRAND L. (1998), "Orthography shapes the perception of speech: The consistency effect in auditory word recognition", *Psychonomic Bulletin & Review* 5 (4), 683-689.
- ZOCCOLOTTI P. *et al.* (2005), "Word length effect in early reading and in developmental dyslexia", *Brain and Language* 93 (3), 369-373.