

L'influence de l'apprentissage du langage écrit sur les aires du langage

The impact of literacy on the language brain areas

Régine Kolinsky^{1,2}, José Morais², Laurent Cohen^{3,4,5}, Ghislaine Dehaene-Lambertz^{6,7,8}, Stanislas Dehaene^{6,7,8,9}

¹ Fonds de la recherche scientifique-FNRS, Belgique

² Unité de recherche en neurosciences cognitives (UNESCOG), Centre de recherche cognition & neurosciences (CRCN), Université libre de Bruxelles (ULB), CP 191, 50 Av. F-Roosevelt, B-1050 Bruxelles, Belgique <rkolins@ulb.ac.be>

³ INSERM, Centre de recherches de l'Institut du cerveau et de la moelle épinière, UMRS 975, Paris, France

⁴ Université Pierre et Marie Curie-Paris 6, Faculté de Médecine Pitié-Salpêtrière, 75013 Paris, France

⁵ Assistance Publique-Hôpitaux de Paris, Groupe hospitalier Pitié-Salpêtrière, 47-83, boulevard de l'Hôpital 75651 Paris cedex 13, France

⁶ INSERM, Cognitive Neuroimaging Unit, NeuroSpin Center, Gif-sur-Yvette 91191, France

⁷ Commissariat à l'énergie atomique, Direction des sciences du vivant, I²BM, Neurospin center, 91191 Gif-sur-Yvette, France

⁸ Université Paris-Sud 11, 91405 Orsay, France

⁹ Collège de France, 11 place Marcelin-Berthelot, 75005 Paris, France

Pour citer cet article : Kolinsky R, Morais J, Cohen L, Dehaene-Lambertz G, Dehaene S. L'influence de l'apprentissage du langage écrit sur les aires du langage. *Rev Neuropsychol* 2014 ; 6 (3) : 173-81 doi:10.1684/nrp.2014.0306

Résumé

L'acquisition de la lecture et de l'écriture, ou littératie, constitue vraisemblablement l'un des plus puissants instruments de transformation cognitive et cérébrale que nous acquérons au cours de notre vie. Dans cette revue, nous discutons du fait que, en plus de permettre l'acquisition de nouvelles connaissances (par l'intermédiaire de la lecture) et le stockage extérieur de l'information (via les notes manuscrites, les livres, les ordinateurs, etc.), la littératie entraîne trois grands types de changements dans les circuits cérébraux du langage. Nous illustrons le fait que l'apprentissage de l'écrit mène non seulement à une activation des aires du langage parlé par l'écrit, mais aussi à des modifications du traitement du langage parlé lui-même, et ce par deux mécanismes. En effet, la littératie améliore le codage phonologique (dans le planum temporale) et conduit, dans certaines situations d'écoute, à une activation « *top-down* » des représentations orthographiques (dans le cortex occipito-temporal gauche). En outre, l'acquisition de la littératie s'accompagne de changements anatomiques, notamment dans la connectivité intra- et inter-hémisphérique. Pour finir, nous discutons des implications théoriques et pratiques de ces découvertes pour les neuropsychologues.

Mots clés : littératie et langage, acquisition de l'écrit • codage phonologique • effets orthographiques sur le traitement de la parole • connectivité cérébrale

Abstract

The acquisition of reading and writing, or literacy, is probably one of the most powerful tools that we acquire in our lives and that transform our brain and cognitive system. In this review, we examine the fact that, beyond allowing the acquisition of new knowledge (through reading) and the external storage of information (through handwritten notes, books, computers, etc.), literacy induces three main changes in the brain networks dedicated to language. Indeed, literacy acquisition not only allows spoken language areas to be activated by written inputs, but also modifies the spoken language system itself through two mechanisms. On the one hand, literacy improves phonological coding (in the planum temporale) and, on the other hand, it makes, in some listening situations, orthographic representations to be activated top-down by spoken inputs (in the left occipito-temporal cortex). In addition, literacy induces anatomical changes, including in intra- and inter-hemispheric connectivity. Lastly, we highlight the theoretical and practical implications of these findings for neuropsychologists.

Key words: literacy and language • reading acquisition • phonological coding • orthographic effects on speech processing • cerebral connectivity

L'écrit et les technologies symboliques associées, comme les notations mathématiques, jouent un rôle fondamental dans l'évolution cognitive. Ces technologies mèneraient à une symbiose telle entre cerveau et culture que des adultes anglophones lettrés vivant dans une société technologiquement avancée ne seraient « guère plus typiques de l'espèce humaine que, par exemple, des membres d'un groupe de chasseurs-cueilleurs » [1, p. 362]. Le système cognitif et cérébral humain serait ainsi le produit non seulement de son héritage génétique, mais aussi de sa propre histoire culturelle, menant à un « cerveau lettré » (« *literacy brain* » [2]).

Les systèmes d'écriture étant très récents dans l'histoire de l'humanité (environ 5 400 ans), il est hautement improbable que nous naissions avec un tel cerveau lettré. Mais du fait d'une plasticité cérébrale suffisante pour recycler certaines aires corticales, la culture peut exploiter les particularités fonctionnelles de notre cerveau (par exemple, dans le système visuel ventral, les propriétés d'invariance de position et de taille ; pour une revue, voir [3]) pour augmenter notre efficacité cognitive [4].

Les études comportementales et d'imagerie cérébrale sur les effets de l'acquisition de la lecture et de l'écriture, ou *littératie*, ont confirmé ces idées. En effet, en plus de permettre l'acquisition de nouvelles connaissances (au travers de la lecture) et d'augmenter leur conservation grâce à un stockage extérieur (via les notes manuscrites, les livres, les ordinateurs, etc.), la littératie mène à un ensemble de transformations cognitives et cérébrales tout à fait remarquables et beaucoup plus importantes que ce qui était supposé jusque récemment.

Notons que la plupart des recherches qui ont permis de montrer ces effets ont comparé des adultes qui, pour des raisons socio-économiques, n'ont jamais appris à lire (*illettrés*) à des adultes lettrés ainsi qu'à des *ex-illettrés* qui, tout comme les illettrés, n'ont jamais fréquenté l'école durant leur enfance mais ont appris à lire à l'âge adulte dans des classes spéciales d'alphabétisation. Par rapport aux travaux qui testent des enfants avant et après le début de l'apprentissage de la lecture, l'avantage des comparaisons entre adultes est de garder constant le facteur de maturation cérébrale. La comparaison des trois groupes permet aussi de déterminer si la plasticité cérébrale est suffisante pour permettre l'apprentissage de la lecture à l'âge adulte.

Nous avons ainsi étudié les corrélations entre l'activation cérébrale en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (*fMRI*) et la vitesse de lecture (nulle chez les illettrés et variable dans les autres groupes). L'apprentissage de la lecture augmente linéairement les réponses aux mots et phrases écrites dans une région du cortex occipito-temporal gauche, dans le gyrus fusiforme [5] (*figure 1*). Ceci rejoint les observations antérieures montrant que cette région, appelée la *VWFA* (pour *visual word form area* [6]) ou, de manière plus informelle, la « boîte aux lettres du cerveau » [3], répond vigoureusement lors de la lecture de mots ou de pseudo-mots – séquences prononçables de lettres sans signification [6-8]. La localisation

Activation de la VWFA aux séquences écrites

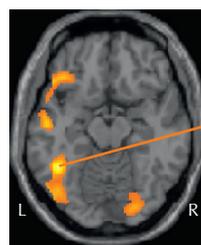


Figure 1. Impact de la littératie sur le cortex ventral occipito-temporal. L'acquisition de la lecture se reflète par d'importants changements dans les réponses des régions cérébrales visuelles ventrales aux séquences de lettres. Chez les adultes présentant des niveaux variables de littératie [5], allant d'une illittératie complète (en mauve) à la lecture experte (en vert), plus la littératie (telle qu'estimée par le nombre de mots lus par minute) augmente, plus augmente l'activation cérébrale en réponse à de brèves séquences écrites, en particulier dans le sulcus occipito-temporal gauche, nommée la *visual word form area* (*VWFA*) [6] ou « boîte aux lettres du cerveau » [3].

de cette région est hautement reproductible d'un individu à l'autre et entre les divers systèmes d'écriture, y inclus des systèmes morpho-syllabiques (dans lesquels certains signes renvoient au sens des mots et non à leur prononciation) comme celui du chinois [9].

Au-delà de l'émergence de ces mécanismes cérébraux permettant la reconnaissance des mots écrits, la littératie influence aussi profondément le traitement du langage parlé et les aires du langage (*figure 2*), ce qui constitue l'objet de la présente revue. Trois grands types d'effets peuvent être relevés.

■ Activation des aires du langage parlé par l'écrit

Chez les lecteurs, mais pas chez les adultes restés 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 du réseau du langage parlé à partir de la modalité visuelle atteignent dans la plupart des régions une intensité équivalente à celle évoquée par l'audition du langage parlé [5] et mène ainsi à un recouvrement important des régions cérébrales activées à la fois par l'écrit et par la parole (*figure 3*). Ceci n'est en fait guère surprenant, puisque l'objet de la lecture est précisément de restituer le langage parlé à partir de la vision, nous offrant une mémoire externe durable. Pour citer Francesco de Quevedo, lire permet donc littéralement d'« écouter les morts¹ avec les yeux ».

¹ Dans le sens de « défunts ».

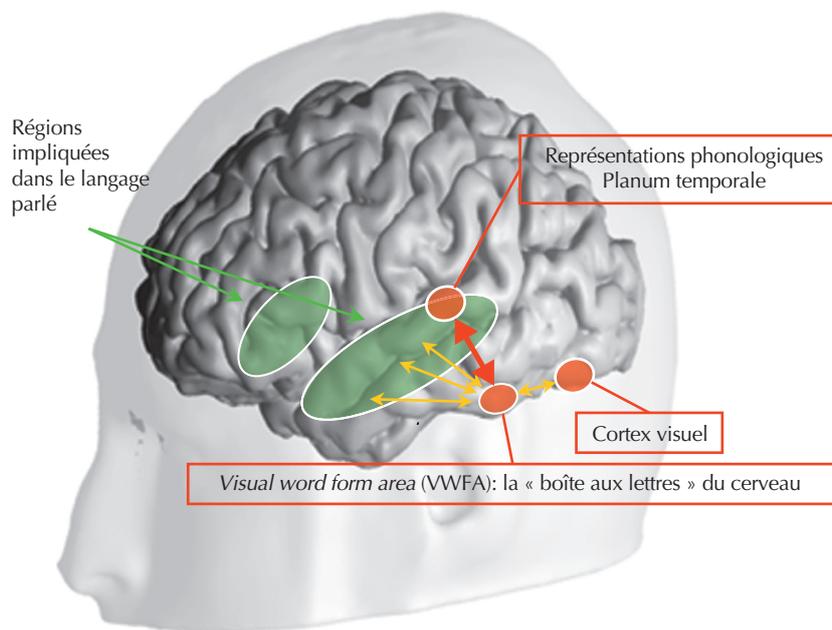


Figure 2. Résumé schématique des changements cérébraux principaux induits par la littératie.

La lecture permet d'accéder au langage oral via la vision. Son acquisition établit ainsi une nouvelle interface entre vision et langage. Dans cette revue, nous discutons plus spécifiquement de l'influence de l'apprentissage du langage écrit dans les aires phonologiques autour du planum temporale ainsi que, par activation des représentations orthographiques lors du traitement de la parole, dans la visual word form area (VWFA) ou « boîte aux lettres du cerveau » (pour une revue des autres changements dans le système visuel, voir [10]).

■ Changements dans le traitement du langage parlé

Beaucoup plus surprenant, la littératie module la manière de traiter le langage parlé. La première étude montrant un effet de ce type utilisa la tomographie par émission de positons pour comparer des adultes illettrés à des adultes lettrés au cours d'une tâche de répétition de mots et de pseudo-mots [11]. Bien que le niveau d'éducation formelle des participants fût un facteur confondant (tous les lettrés avaient été scolarisés pendant leur enfance), cette étude suggéra que l'acquisition de la lecture améliore le codage phonologique. En effet, au cours de la répétition de pseudo-mots, les illettrés présentaient une performance inférieure et des activations cérébrales différentes de celles de lettrés. De manière cohérente, une étude menée chez des enfants a montré que le niveau de lecture atteint à six ans permet de prédire l'amélioration des performances en répétition de pseudo-mots au cours de l'année qui suit [12]. Des travaux plus récents d'imagerie cérébrale comparant des adultes illettrés, ex-illettrés et lettrés [5, 13] ainsi que des enfants pré-lecteurs et lecteurs du même âge [14] ont confirmé que la littératie modifie le traitement du langage parlé d'au moins deux manières.

■ Changements dans le planum temporale : une modification des représentations phonologiques ?

L'acquisition de la lecture augmente les réponses au langage parlé dans le cortex auditif, plus précisément dans le planum temporale (PT) : le niveau d'activation de cette région est deux fois supérieur chez les adultes lettrés que chez les illettrés [5] (*figure 4a*). Cette augmentation massive d'activation est observée tant en écoute passive de phrases parlées que dans une tâche de décision lexicale auditive (« cette séquence parlée est-elle un vrai mot ou non ? »). Une augmentation similaire des réponses du PT en lien avec l'acquisition de la lecture est observée chez les enfants [14]. Par ailleurs, comparés aux normo-lecteurs, les enfants présentant une dyslexie développementale (qui sont d'intelligence normale mais souffrent d'une difficulté spécifique d'apprentissage de la lecture) montrent également une réduction d'activation dans cette région lorsqu'ils écoutent de la parole [15, 16].

Le PT est une région du cortex temporal supérieur, située juste en arrière du gyrus de Heschl, impliquée dans le codage des phonèmes (la plus petite unité permettant de distinguer des mots les uns des autres que l'on puisse isoler par segmentation dans la chaîne parlée). C'est une région essentielle pour la perception catégorielle de la parole [e.g.,

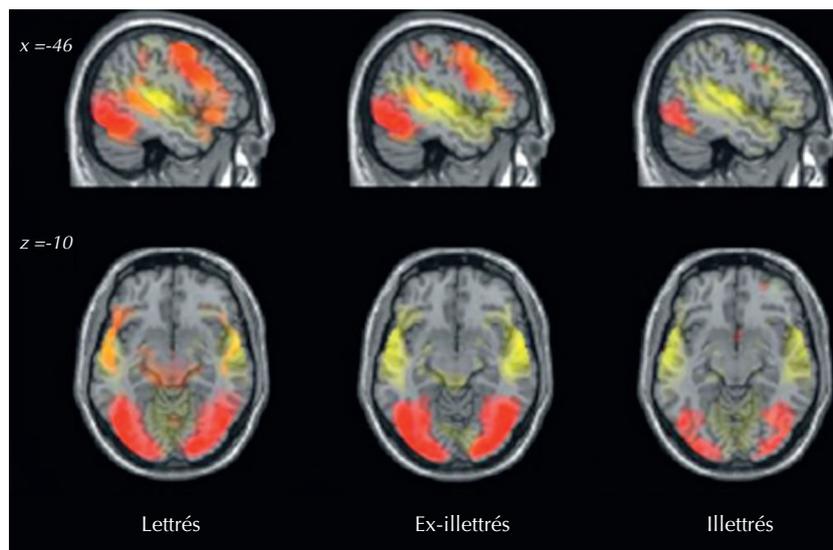


Figure 3. Comparaison des activations en réponse à l'écrites et l'oral.

Chez les adultes lettrés, on constate un recouvrement (en orange) plus important que chez les illettrés des aires activées à la fois par des phrases écrites (en rouge) et par des phrases parlées (en jaune).

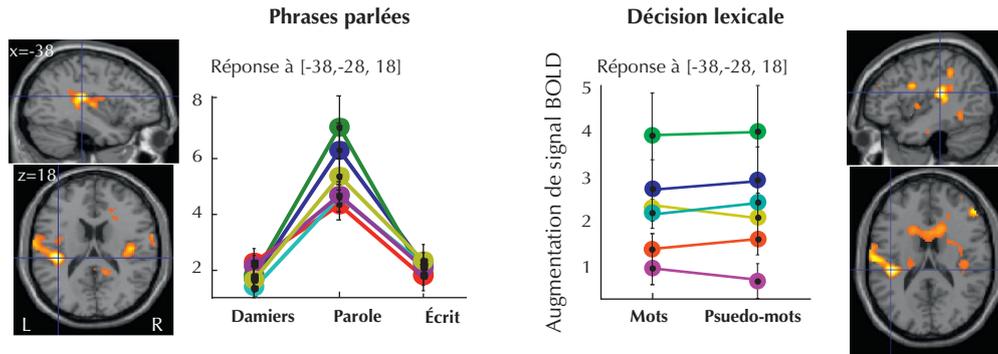
17], qui répond aussi lors de la lecture labiale silencieuse [18] et est sensible à la congruence entre un phonème et la présentation visuelle simultanée d'une lettre [19], un effet absent chez les personnes dyslexiques [15].

L'augmentation d'activation du PT avec la littératie pourrait donc refléter un raffinement des représentations phonologiques. Des études comportementales menées il y a déjà plus de trente ans avaient montré que la prise de conscience des phonèmes ne se développe que chez les personnes ayant appris à lire dans un code alphabétique. Ni les enfants pré-lecteurs [20] ni les analphabètes, qu'ils soient totalement illettrés [21] ou lettrés dans un système non-alphabétique [22], ne parviennent à réaliser des jeux de langage exigeant une telle conscience phonologique : dénombrer les phonèmes (quatre phonèmes dans le mot « France »), ou supprimer le premier phonème d'un mot (« France » → « rance »), etc. Plus récemment, une étude d'imagerie cérébrale a montré que chez les enfants, l'activation du PT est corrélée non seulement avec le niveau de lecture, mais aussi avec le vocabulaire, la mémoire verbale et la prise de conscience des phonèmes [16]. Par ailleurs, l'activation cérébrale augmente entre 8-12 ans et l'âge adulte lors d'une tâche orale de jugement de rime (e.g., « demain-gamin ») non seulement dans des régions frontales inférieures, typiquement impliquées dans les tâches métaphonologiques [e.g., 23, 24], mais aussi dans des aires phonologiques du gyrus temporal supérieur gauche [25]. Il est intéressant de noter que cette augmentation d'activation du gyrus temporal supérieur gauche entre l'enfance et l'âge

adulte n'est observée que chez les lecteurs d'un code alphabétique (l'anglais), pas chez les lecteurs d'un système morphosyllabique, dans lequel les caractères représentent des syllabes porteuses d'un sens autonome (le chinois) [25]. Donc, l'augmentation d'activation IRMf du PT observée chez les adultes lettrés [5] pourrait refléter la modification, lors du processus d'acquisition de la lecture, de représentations phonologiques par les connaissances orthographiques et/ou métaphonologiques.

Il reste à déterminer si la littératie affecte non seulement la conscience phonologique mais aussi les représentations phonologiques implicites utilisées dans la perception de la parole. De fait, les adultes illettrés possèdent une phonologie implicite sophistiquée : ils discriminent très bien des syllabes comme /pa/ et /ba/ [e.g., 26]. Tout comme les lettrés, ils présentent un lexique auditif phonologiquement restructuré, avec un codage interne des mots parlés modulé par la fréquence d'occurrence des mots et le nombre de mots phonologiquement proches [27]. Ils utilisent ces codes phonémiques implicites lors de la reconnaissance [28] et la production [29] des mots. Néanmoins, ils pourraient différer des lettrés par la précision des frontières de catégories phonémiques. Les illettrés ont une perception catégorielle de la parole : tout comme les lettrés, ils « négligent » les variations acoustiques non pertinentes (intra-catégorielles) lors de la discrimination de syllabes comme /ba/ et /da/. Toutefois, ils ne semblent pas percevoir aussi nettement que les lettrés la transition d'un phonème à l'autre dans un continuum acoustique [30].

A Augmentation des réponses au langage parlé



Lettrés (Brésil)
 Lettrés (Portugal)
 Lettrés de niveau socio-économique = aux illettrés (Brésil)
 Ex-illettrés (Brésil)
 Ex-illettrés (Portugal)
 Ex-illettrés (Brésil)

B Augmentation de la connectivité avec la VWFA

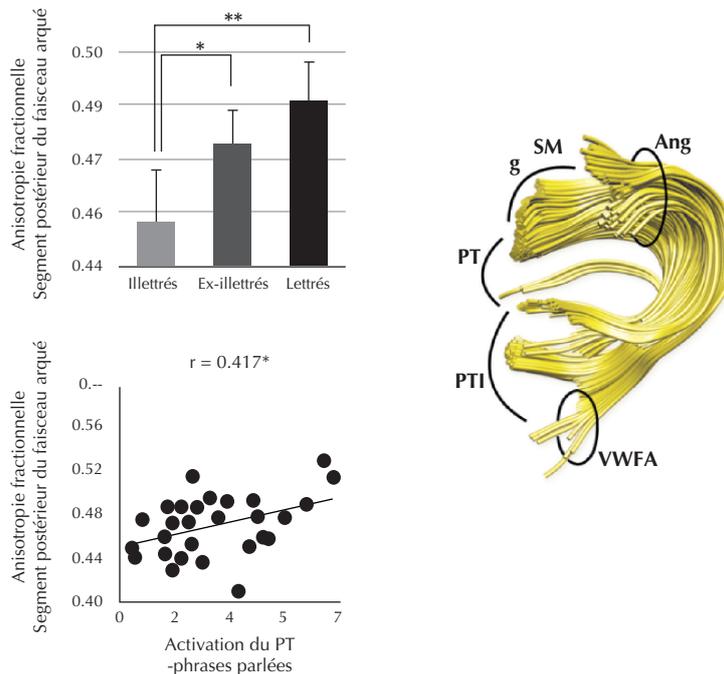


Figure 4. Impact de la littératie sur le cortex temporal supérieur, une région impliquée dans le traitement auditif de la parole. a) Si on examine des sujets allant d'une illittératie complète (en mauve) à des lecteurs experts (en vert), on constate une forte augmentation des réponses au langage parlé dans le planum temporel, tant en décision lexicale auditive qu'en écoute passive de phrases parlées [5]. b) Des corrélats structuraux des liens renforcés entre les systèmes visuel orthographique (VWFA) et auditif phonologique (PT) ont été mis en évidence sous la forme d'une augmentation d'anisotropie fractionnelle dans la branche postérieure du faisceau arqué gauche, chez les adultes lettrés et ex-illettrés en comparaison aux illettrés [41]. Cette augmentation corrèle avec l'activation du PT lors de l'écoute de phrases parlées.

■ Activation de la VWFA par la parole : accès « top-down » à l'orthographe

Autre effet lié à la littératie, la VWFA des sujets lettrés est activée par l'écoute de mots parlés. Cette activation est orthographique plutôt que sémantique. En effet, absente chez les illettrés, elle n'est observée que chez les lettrés et ex-illettrés, et est proportionnelle au score de lecture [5]. Notons que chez les adultes lettrés l'activation du cortex inféro-temporal gauche est aussi observée lors de tâches difficiles portant sur des mots parlés, tâches exigeant une segmentation en phonèmes [31] ou un jugement oral de rime de paires de mots dont l'orthographe est conflictuelle, comme « demain-gamin » [e.g., 32, 33].

Ces observations rejoignent de nombreuses données comportementales montrant que les représentations orthographiques sont recrutées même dans des situations purement auditives. Ceci est vrai tant dans le traitement métaphonologique (avec, par exemple, des jugements de rime plus rapides pour des paires de mots parlés à l'orthographe non-conflictuelle que conflictuelle [34]) que dans le traitement lexico-sémantique. En décision lexicale, notamment, on constate un effet de *consistance orthographique* [35], avec des réponses plus rapides aux mots contenant une rime qui ne peut s'écrire que d'une seule manière dans la langue (e.g., « biche ») qu'aux mots incluant une rime qui peut s'écrire différemment dans d'autres mots de la langue (e.g., « caisse », cf. « messe »).

Les psycholinguistes débattent de la question de savoir si de tels effets indiquent que les représentations orthographiques sont activées de manière « top-down » lors du traitement des mots parlés ou si l'apprentissage de la lecture a altéré les représentations phonologiques. Les études d'imagerie cérébrale suggèrent que les deux phénomènes coexistent. L'augmentation d'activation IRMf du PT chez les adultes lettrés comparés aux illettrés [5], ainsi que des données issues des techniques d'électroencéphalographie [36] et de stimulation magnétique transcrânienne [37] montrant que des aires phonologiques (e.g., le gyrus supramarginal gauche) sont la source des effets de consistance orthographique, appuient l'idée que le codage phonologique est amélioré par la littératie. Toutefois, on ne comprend pas encore bien pourquoi certains processus de perception de la parole sont insensibles aux effets de la littératie, comme nous l'avons vu supra, § « Changements dans le planum temporale ». L'activation de la VWFA suggère un recrutement additionnel des représentations orthographiques qui n'est observé que lorsque l'accès au code orthographique est utile à la tâche, par exemple en situation de décision lexicale auditive, et pas pendant l'écoute passive de mots [5] ni lorsque l'attention des auditeurs est dirigée vers des propriétés non-linguistiques du stimulus auditif [e.g., 33]. Les contributions relatives de ces deux mécanismes et des régions cérébrales associées dépendent donc de la tâche en cours.

Les liens entre orthographe et phonologie varient aussi avec l'âge. Tant des études comportementales

que d'imagerie cérébrale ont montré que les effets de l'orthographe sont plus généralisés chez les enfants, pendant les premières années d'apprentissage de la lecture, que chez l'adulte [14, 38-40]. Ceci reflète vraisemblablement l'utilisation intensive des correspondances graphèmes-phonèmes et phonèmes-graphèmes à ce stade précoce de la littératie, ce qui contribuerait à établir un flux actif d'informations entre les représentations orthographiques et phonologiques.

■ Changements anatomiques dans les circuits du langage parlé

La littératie non seulement établit un lien fonctionnel entre les représentations phonologiques et orthographiques, mais mène aussi à des changements structuraux de connectivité cérébrale. La littératie modifie la portion temporo-pariétale postérieure du faisceau arqué gauche [41], un ensemble d'axones qui relie le lobe temporal postérieur (y inclus la VWFA) au lobule pariétal inférieur et aux régions temporales supérieures postérieures (y inclus le PT). L'anisotropie fractionnelle de ce faisceau est positivement corrélée à la maîtrise de la lecture, les ex-illettrés occupant une situation intermédiaire entre illettrés et lettrés. L'anisotropie fractionnelle est une mesure de l'organisation de la matière blanche sensible à l'alignement des fibres et à leur myélinisation. Ce changement anatomique est lui-même corrélé au degré d'activation fonctionnelle observé dans la VWFA en réponse à des phrases écrites et dans le PT en réponse à la parole [41] (*figure 4b*). Ce faisceau de fibres relierait aires visuelles et aires phonologiques et pourrait participer à la voie de lecture basée sur la conversion graphème-phonème, dont l'acquisition est au cœur de la littératie [e.g., 42]. Le faisceau arqué change, de même, au cours de l'acquisition de la lecture chez les enfants, en corrélation avec leurs capacités de lecture [43, 44].

La connectivité inter-hémisphérique est aussi modifiée par la littératie, avec un épaississement du splénium ou de l'isthme du corps calleux [13, 45, 46]. Ceci permettrait l'amélioration du transfert inter-hémisphérique de l'information phonologique ou visuelle [6, 47]. Notons que, en outre, la littératie mène à une augmentation de densité de la matière grise dans diverses régions impliquées dans la lecture, notamment le gyrus angulaire, le gyrus supramarginal gauche et l'arrière du gyrus temporal supérieur [13, 45, 46].

■ Conclusion et implications pratiques

La littératie s'accompagne de plusieurs changements majeurs dans l'organisation du cerveau (voir *figure 2*). Son effet principal est de créer une nouvelle interface grâce à laquelle on peut accéder, à partir de la vision, à des représentations qui sont normalement propres au langage parlé. Ce changement est largement dû à une réorganisation du

système visuel occipito-temporal, dans lequel émerge, avec l'acquisition de la lecture, une région prenant en charge la reconnaissance des suites de lettres, la VWFA ou « boîte aux lettres du cerveau ».

Cependant, l'effet de la littératie dépasse largement cette région, et affecte les régions temporales supérieures gauches impliquées dans l'analyse phonologique (planum temporelle). Anatomiquement, les connexions de ces régions (corps calleux postérieur et faisceau arqué gauche) sont modifiées. Fonctionnellement, ces changements mènent à des interactions bidirectionnelles fluides : les lettres peuvent être converties en sons, et inversement le traitement du langage parlé peut être modulé par les représentations orthographiques.

De tels changements n'ont rien d'unique : l'acquisition d'autres types d'expertise conduit aussi à des changements de structure cérébrale, notamment dans la matière blanche (pour une revue, voir e.g., [48]). En ce qui concerne la lecture, il est hautement probable que ces changements anatomiques augmentent la vitesse et la facilité de transmission à longue distance de l'information dans le cerveau lettré. Ceci pourrait contribuer à expliquer la moindre prévalence de la démence chez les adultes lettrés comparés aux illettrés, un phénomène souvent rapporté mais toujours fortement débattu (pour une revue, voir [49]). Ces données récentes pourraient aussi expliquer pourquoi l'impact de lésions cérébrales unilatérales diffère entre illettrés et lettrés, un champ de recherche qui a mené à des résultats conflictuels. En effet, certaines recherches rapportent que la fréquence de l'aphasie suite à une lésion de l'hémisphère gauche ou droit varie en fonction du niveau de littératie des patients [e.g., 50], alors que d'autres ne trouvent aucune différence entre patients illettrés et lettrés [e.g., 51]. Ces données ont été mises en relation avec la notion de dominance hémisphérique gauche pour le langage, qui pourrait être modulée par le niveau de littératie : la représentation cérébrale du langage serait plus bilatérale chez les illettrés [e.g., 50]. Mais les données de latéralisation cérébrale chez les sujets sains illettrés et lettrés, la plupart collectées avec la technique d'écoute dichotique, sont elles aussi contradictoires et peu concluantes. En fait, il semble que les différences observées soient liées à des différences de niveau de performance [52]. Il est toutefois possible que les conséquences de lésions unilatérales puissent être modulées par la littératie de manière plus subtile, au travers des effets de celle-ci sur les connexions intra- et inter-hémisphériques. De manière plus générale, les effets de la littératie tant au niveau du cerveau qu'au niveau du comportement doivent mener le neuropsychologue à une grande prudence dans l'interprétation de tests de perception de la parole et de mémoire verbale, dont les résultats sont affectés directement ou indirectement par la maîtrise de la lecture [e.g., 11, 53].

Par ailleurs, l'étude d'adultes ex-illettrés est pertinente pour évaluer la plasticité cérébrale et les facteurs qui l'influencent. En effet, les circuits de la lecture semblent rester plastiques tout au long de la vie. La plupart des effets de l'apprentissage de la lecture sur la fonction et

la structure du cerveau sont en effet visibles tant chez les personnes qui ont suivi des cours d'alphabétisation à l'âge adulte que chez celles qui ont été scolarisées dans l'enfance [5, 13]. Les ex-illettrés atteignent rarement les mêmes performances de lecture et les mêmes niveaux d'activation cérébrale que les sujets scolarisés pendant l'enfance [5], mais ces différences pourraient n'être dues qu'à leur niveau plus faible en lecture et à la moindre pratique quotidienne de la lecture.

La comparaison d'adultes lettrés et illettrés, ainsi que d'enfants pré-lettrés ou déjà lecteurs mais d'âge comparable, permet aussi de mieux interpréter les résultats observés chez les personnes dyslexiques. Comme nous l'avons vu, celles-ci présentent une moindre activation du PT par rapport aux normo-lecteurs, tant en réponse à de la parole que lors de l'intégration graphème-phonème. Néanmoins, l'activation du PT est aussi réduite chez des adultes qui sont restés illettrés pour des raisons socio-économiques [5] ainsi que chez les enfants pré-lecteurs [14]. Ainsi, bien qu'il semble que les dyslexiques souffrent d'anomalies précoces du traitement phonémique impliquant le PT [e.g., 54], la réduction d'activation du PT pourrait ne pas être une cause de la dyslexie, mais serait plutôt une conséquence d'un niveau faible (chez les dyslexiques) ou nul (chez les illettrés et pré-lettrés) de maîtrise de la lecture, et donc une conséquence des difficultés d'apprentissage de la lecture des personnes dyslexiques.

L'ensemble de ces données a des implications importantes pour les politiques éducatives. Il faut en effet relever que la plupart des changements induits par la littératie concernent la voie de conversion graphème-phonème. Ceci semble en accord avec les résultats de la recherche en éducation montrant qu'un entraînement focalisé sur la phonologie (ou « méthode phonique ») est la stratégie la plus efficace pour l'enseignement de la lecture [e.g., 55-57]. C'est vers cette conclusion que convergent aussi les études d'imagerie cérébrale et d'électrophysiologie montrant que chez les enfants pré-lettrés la sensibilité cérébrale à l'écrit augmente après un entraînement aux correspondances graphèmes-phonèmes [58] et que, chez l'adulte confronté à un nouvel alphabet, ce type d'entraînement phonique est plus efficace que l'attention aux mots considérés dans leur globalité [59]. Il semble par ailleurs que l'adjonction du geste moteur lors de l'écriture manuelle soit aussi une aide positive pour acquérir les correspondances graphème-phonème. Là encore, les données d'imagerie confirment des données comportementales [60], et les enfants dyslexiques les plus efficaces sont ceux qui activent le plus les représentations motrices de la main [16].

Ces diverses implications montrent l'importance d'étudier les conséquences cognitives et cérébrales de la littératie en dehors de toute pathologie. L'illettrisme tend (fort heureusement) à disparaître, et bientôt il ne nous sera plus possible d'explorer l'impact de l'acquisition de la lecture en comparant des adultes lettrés et illettrés. Pourtant ces études sont exemplaires pour comprendre les transformations cérébrales liées à la culture. Devrons-nous alors nous contenter

d'étudier seulement les membres *WEIRD* (« Western, Educated, Industrialized, Rich, and Democratic », cf. [61]) de l'humanité et spéculer sur le reste, laissant démuni le neuropsychologue face à une déviation de la norme pour répondre à la question : culture ou lésion ?

Remerciements

La préparation de cette revue a bénéficié du soutien du Fonds de la recherche scientifique-FNRS, convention

FRFC 2.4515.12, et du Service public de programmation de la Politique scientifique fédérale (BELSPO), convention IAP 7/33. Le premier auteur est directeur de recherches du Fonds de la recherche scientifique (FNRS), Belgique.

Liens d'intérêts

les auteurs déclarent ne pas avoir de conflit d'intérêt en rapport avec cet article.

Références

1. Donald M. The mind considered from a historical perspective: human cognitive phylogenesis and the possibility of continuing cognitive evolution. In : Johnson D, Ermeling C, eds. *The future of the cognitive revolution*. New York: Oxford University Press, 1997, p. 355-65.
2. Donald M. The central role of culture in cognitive evolution: a reflection on the myth of the 'isolated mind'. In : Nucci L, éd. *Culture, thought and development*. Mahwah NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 2000, p. 19-38.
3. Dehaene S. *Les neurones de la lecture*. Paris : Éditions Odile Jacob, 2007.
4. Dehaene S, Cohen L. Cultural recycling of cortical maps. *Neuron* 2007 ; 56 : 384-98.
5. Dehaene S, Pegado F, Braga L, et al. How learning to read changes the cortical networks for vision and language. *Science* 2010 ; 330 : 1359-64.
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.
7. Dehaene S, Cohen L. The unique role of the visual word form area in reading. *Trends Cogn Sci* 2011 ; 15 : 254-62.
8. Dehaene S, Le Clec'HG, Poline JB, et al. The visual word form area: a prelexical representation of visual words in the fusiform gyrus. *Neuroreport* 2002 ; 13 : 321-5.
9. Bolger DJ, Perfetti CA, Schneider W. Cross-cultural effect on the brain revisited: universal structures plus writing system variation. *Hum Brain Mapp* 2005 ; 25 : 92-104.
10. Kolinsky, R. How learning to read influences language and cognition. In: Pollatsek A, Treiman R, eds. *The Oxford Handbook of Reading*. New York: Oxford University Press (sous presse), doi: 10.1093/oxfordhb/9780199324576.013.29.
11. 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.
12. Nation K, Hulme C. Learning to read changes children's phonological skills: evidence from a latent variable longitudinal study of reading and nonword repetition. *Dev Sci* 2011 ; 14 : 649-59.
13. Carreiras M, Seghier M, Baquero S, et al. An anatomical signature for literacy. *Nature* 2009 ; 461 : 983-6.
14. Monzalvo K, Dehaene-Lambertz G. How reading acquisition changes children's spoken language network. *Brain Lang* 2013 ; 127 : 356-65.
15. 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.
16. Monzalvo K, Fluss J, Billard C, et al. Cortical networks for vision and language in dyslexic and normal children of variable socio-economic status. *Neuroimage* 2012 ; 61 : 258-74.
17. Chang EF, Rieger JW, Johnson K, et al. Categorical speech representation in human superior temporal gyrus. *Nat Neurosci* 2010 ; 13 : 1428-32.
18. Calvert GA, Bullmore ET, Brammer MJ, et al. Activation of auditory cortex during silent lipreading. *Science* 1997 ; 276 : 593-6.
19. Van Atteveldt N, Formisano E, Goebel R, et al. Integration of letters and speech sounds in the human brain. *Neuron* 2004 ; 43 : 271-82.
20. Liberman IY, Shankweiler D, Fischer FW, et al. Explicit syllable and phoneme segmentation in the young child. *J Exp Child Psychol* 1974 ; 18 : 201-12.
21. Morais J, Cary L, Alegria J, et al. Does awareness of speech as a sequence of phones arise spontaneously? *Cognition* 1979 ; 7 : 323-31.
22. Read C, Zhang Y, Nie H, et al. The ability to manipulate speech sounds depends on knowing alphabetic reading. *Cognition* 1986 ; 24 : 31-44.
23. Burton MW, Small SL, Blumstein SE. The role of segmentation in phonological processing: an fMRI investigation. *J Cogn Neurosci* 2000 ; 12 : 679-90.
24. Zatorre RJ, Meyer E, Gjedde A, et al. PET studies of phonetic processing of speech: review, replication, and reanalysis. *Cereb Cortex* 1996 ; 6 : 21-30.
25. Brennan C, Cao F, Pedroarena-Leal N, et al. Reading acquisition reorganizes the phonological awareness network only in alphabetic writing systems. *Hum Brain Mapp* 2013 ; 34 : 3354-68.
26. Adriañ A, Alegria J, Morais J. Metaphonological abilities of spanish illiterate adults. *Int J Psychol* 1995 ; 30 : 329-53.
27. Ventura P, Kolinsky R, Fernandes S, et al. Lexical restructuring in the absence of literacy. *Cognition* 2007 ; 105 : 334-61.
28. Morais J, Kolinsky R. Perception and awareness in phonological processing: the case of the phoneme. *Cognition* 1994 ; 50 : 287-97.
29. Ventura P, Kolinsky R, Querido JL, et al. Is phonological encoding in naming influenced by literacy? *J Psycholinguist Res* 2007 ; 36 : 341-60.
30. Serniclaes W, Ventura P, Morais J, et al. Categorical perception of speech sounds in illiterate adults. *Cognition* 2005 ; 98 : B35-44.
31. Burton MW, Locasto PC, Krebs-Noble D, et al. A systematic investigation of the functional neuroanatomy of auditory and visual phonological processing. *Neuroimage* 2005 ; 26 : 647-61.
32. Booth JR, Burman DD, Meyer JR, et al. Development of brain mechanisms for processing orthographic and phonologic representations. *J Cogn Neurosci* 2004 ; 16 : 1234-49.
33. Yoncheva YN, Zevin JD, Maurer U, et al. Auditory selective attention to speech modulates activity in the visual word form area. *Cereb Cortex* 2010 ; 20 : 622-32.
34. Seidenberg MS, Tanenhaus MK. Orthographic effects on rhyme monitoring. *J Exp Psychol Hum Learn* 1979 ; 5 : 546-54.
35. Ziegler JC, Ferrand L. Orthography shapes the perception of speech: The consistency effect in auditory word recognition. *Psychon Bull Rev* 1998 ; 5 : 683-9.
36. Perre L, Pattamadilok C, Montant M, et al. Orthographic effects in spoken language: on-line activation or phonological restructuring? *Brain Res* 2009 ; 1275 : 73-80.
37. Pattamadilok C, Knierim IN, Duncan KJ, et al. How does learning to read affect speech perception? *J Neurosci* 2010 ; 30 : 8435-44.
38. Church JA, Coalson RS, Lugar HM, et al. A developmental fMRI study of reading and repetition reveals changes in phonological and visual mechanisms over age. *Cereb Cortex* 2008 ; 18 : 2054-65.
39. Pattamadilok C, Morais J, De Vylder O, et al. The orthographic consistency effect in the recognition of French spoken words: An early

- developmental shift from sublexical to lexical orthographic activation. *Appl Psycholinguist* 2009; 30 : 441-62.
40. Ventura P, Morais J, Kolinsky R. The development of the orthographic consistency effect in speech recognition: from sublexical to lexical involvement. *Cognition* 2007; 105 : 547-76.
41. Thiebaut de Schotten M, Cohen L, Amemiya E *et al.* Learning to read improves the structure of the arcuate fasciculus. *Cereb Cortex* (sous presse), doi:10.1093/cercor/bhs383.
42. Share DL. Phonological recoding and self-teaching: sine qua non of reading acquisition. *Cognition* 1995; 55 : 151-218.
43. Yeatman JD, Dougherty RF, Rykhlevskaia E, *et al.* Anatomical properties of the arcuate fasciculus predict phonological and reading skills in children. *J Cogn Neurosci* 2011; 23 : 3304-17.
44. Yeatman JD, Dougherty RF, Ben-Shachar M, *et al.* Development of white matter and reading skills. *Proc Natl Acad Sci USA* 2012; 109 : 3045-53.
45. Castro-Caldas A, Miranda PC, Carmo I, *et al.* Influence of learning to read and write on the morphology of the corpus callosum. *Eur J Neurol* 1999; 6 : 23-8.
46. Petersson KM, Silva C, Castro-Caldas A, *et al.* A. Literacy: a cultural influence on functional left-right differences in the inferior parietal cortex. *Eur J Neurosci* 2007; 26 : 791-9.
47. Molko N, Cohen L, Mangin JF, *et al.* Visualizing the neural bases of a disconnection syndrome with diffusion tensor imaging. *J Cogn Neurosci* 2002; 14 : 629-36.
48. May A. Experience-dependent structural plasticity in the adult human brain. *Trends Cogn Sci* 2011; 15 : 475-82.
49. Ardila A, Bertolucci PH, Braga LW, *et al.* Illiteracy: the neuropsychology of cognition without reading. *Arch. Clin. Neuropsychol.* 2010; 25 : 689-712.
50. Lecours AR, Mehler J, Parente MA, *et al.* Illiteracy and brain damage 3: a contribution to the study of speech and language disorders in illiterates with unilateral brain damage (initial testing). *Neuropsychologia* 1988; 26 : 575-89.
51. Damasio AR, Castro-Caldas A, Grosso JT, *et al.* Brain specialization for language does not depend on literacy. *Archiv Neurol* 1976; 33 : 300-1.
52. Castro SL, Morais J. Ear differences in illiterates. *Neuropsychologia* 1987; 25 : 409-17.
53. Kosmidis MH, Zafiri M, Politimou N. Literacy versus formal schooling: influence on working memory. *Arch Clin Neuropsychol* 2011; 26 : 575-82.
54. Lehongre K, Ramus F, Villiermet N, *et al.* Altered low- γ sampling in auditory cortex accounts for the three main facets of dyslexia. *Neuron* 2011; 72 : 1080-90.
55. Deauvieu J. *Lecture au CP : un effet-manuel considérable*, Rapport de Recherche, Université de Versailles St-Quentin-en-Yvelines, 2013.
56. National Institute of Child Health and Human Development. *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* (NIH Publication No. 00-4769). U.S. Government Printing Office, 2000.
57. Observatoire National de la Lecture *Apprendre à Lire*. (Org: Morais J, Robillart G). Paris: CNDP and Éditions Odile Jacob, 1998.
58. Brem S, Bach S, Kucian K, *et al.* Brain sensitivity to print emerges when children learn letter-speech sound correspondences. *Proc Natl Acad Sci USA* 2010; 107 : 7939-44.
59. Yoncheva YN, Blau VC, Maurer U, *et al.* Attentional focus during learning impacts N170 ERP responses to an artificial script. *Dev Neuropsychol* 2010; 35 : 423-45.
60. Longcamp M, Boucard C, Gilhodes JC, *et al.* Learning through hand- or typewriting influences visual recognition of new graphic shapes: behavioral and functional imaging evidence. *J Cogn Neurosci* 2008; 20 : 802-15.
61. Henrich J, Heine SJ, Norenzayan A. The weirdest people in the world? *Behav Brain Sci* 2010; 33 : 61-135.